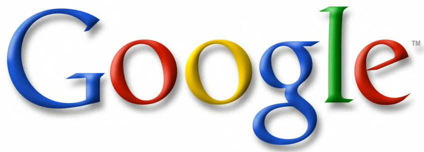


This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

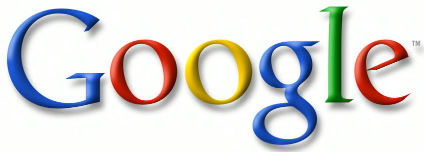
Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`



A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

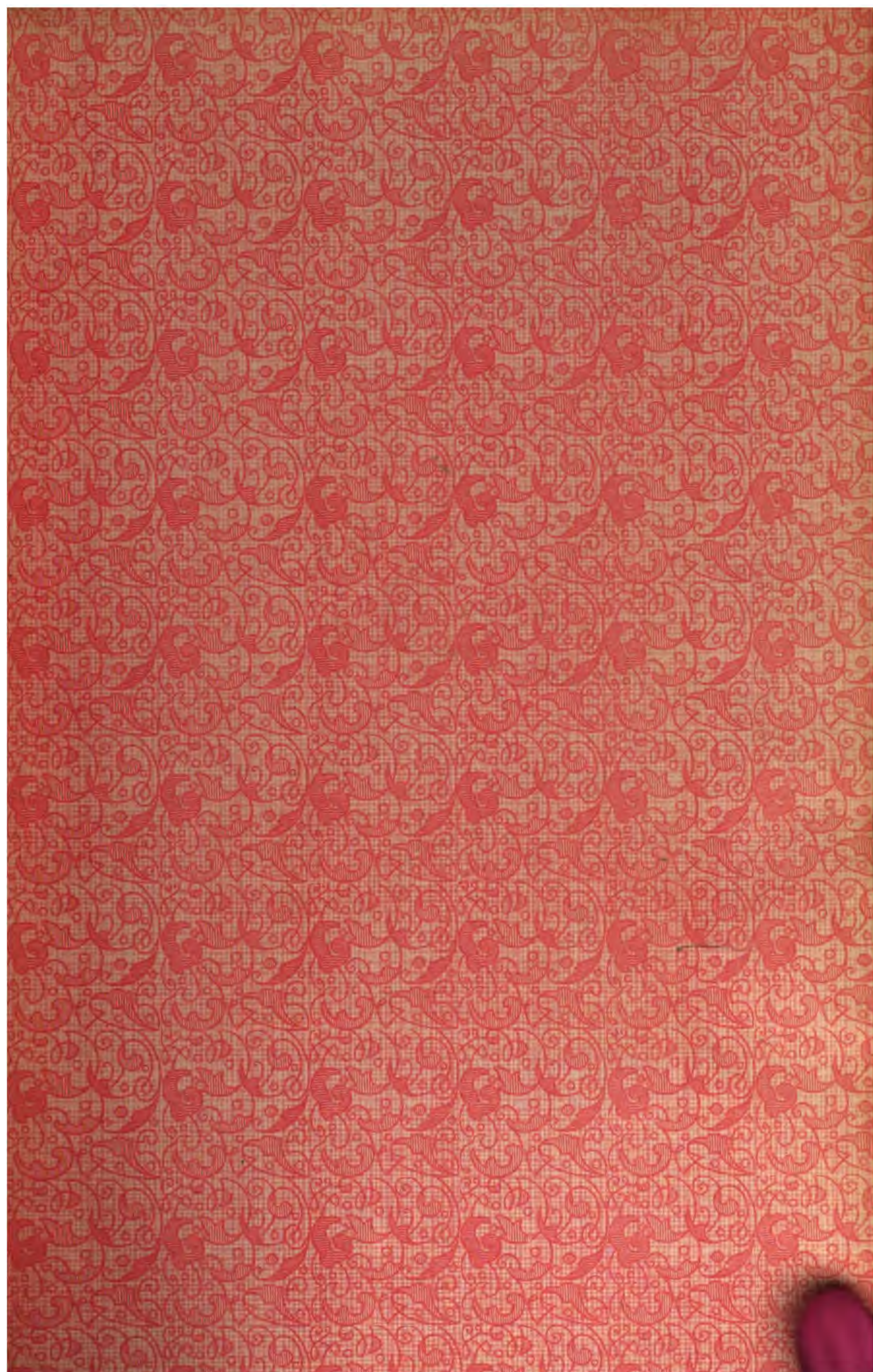
Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.
+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.
+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.
+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`



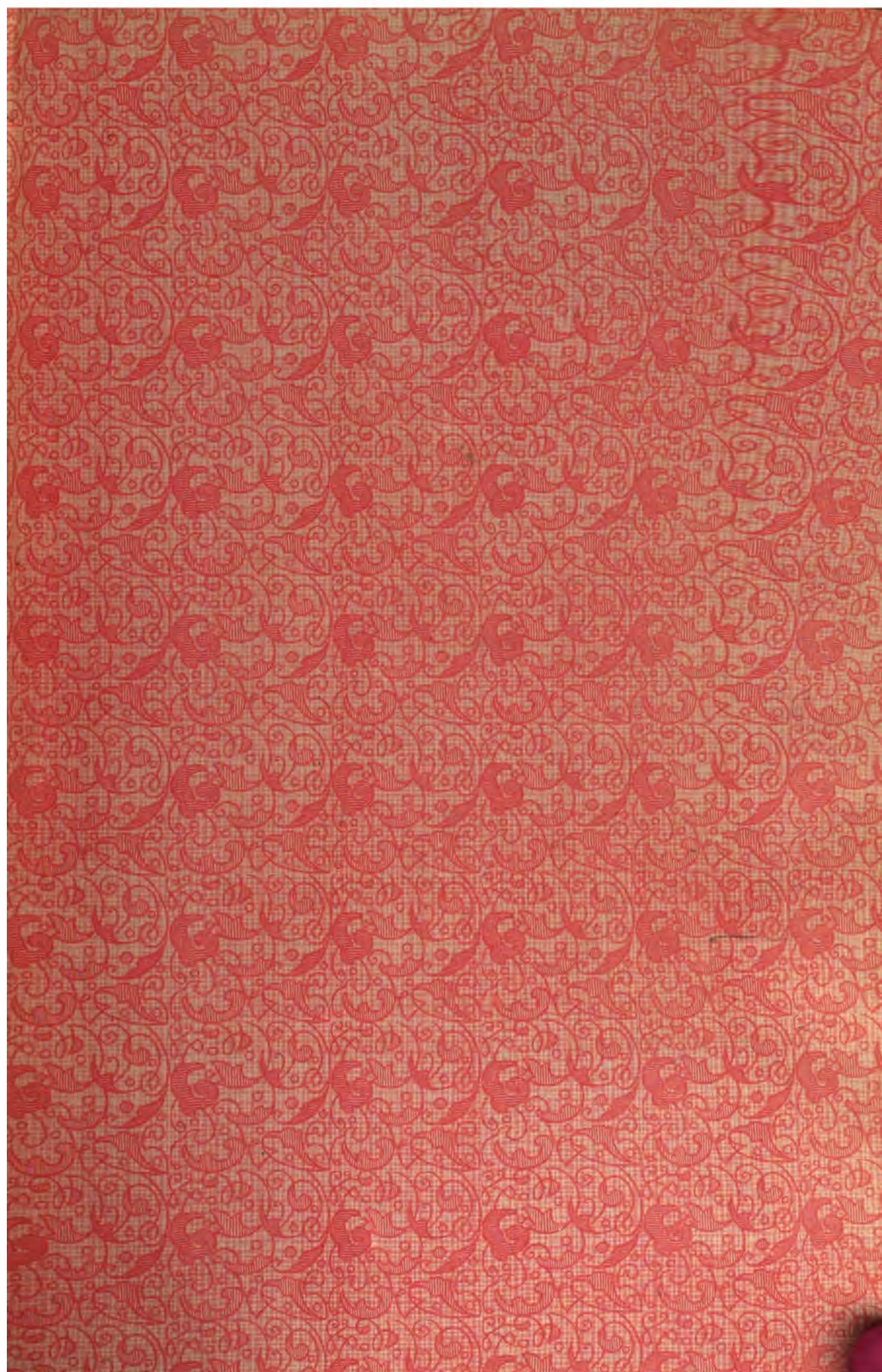



3 6105 032 223 898

The Branner Geological Library



LELAND·STANFORD·JVNIOR·VNIVERSITY



551.49
D236a

LES

EAUX SOUTERRAINES

AUX ÉPOQUES ANCIENNES

IMPRIMERIE A. LAHURE
9, RUE DE FLEURUS, 9

LES

EAUX SOUTERRAINES

AUX ÉPOQUES ANCIENNES

RÔLE QUI LEUR REVIENT DANS L'ORIGINE ET LES MODIFICATIONS
DE LA SUBSTANCE DE L'ÉCORCE TERRESTRE

PAR

A. DAUBRÉE

MEMBRE DE L'INSTITUT
INSPECTEUR GÉNÉRAL DES MINES EN RETRAITE, DIRECTEUR HONORAIRE DE L'ÉCOLE NATIONALE DES MINES
PROFESSEUR DE GÉOLOGIE AU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE

PARIS
V^{VE} CH. DUNOD, ÉDITEUR
Libraire des Corps des Ponts et Chaussées, des Mines et des Télégraphes
49, QUAI DES AUGUSTINS, 49

1887

Tous droits réservés

LES

EAUX SOUTERRAINES

AUX ÉPOQUES ANCIENNES

IMPRIMERIE A. LAHURE
9, RUE DE FLEURUS, 9

LES

EAUX SOUTERRAINES

AUX ÉPOQUES ANCIENNES

RÔLE QUI LEUR REVIENT DANS L'ORIGINE ET LES MODIFICATIONS
DE LA SUBSTANCE DE L'ÉCORCE TERRESTRE

PAR

A. DAUBRÉE

MEMBRE DE L'INSTITUT
INSPECTEUR GÉNÉRAL DES MINES EN RETRAITE, DIRECTEUR HONORAIRE DE L'ÉCOLE NATIONALE DES MINES
PROFESSEUR DE GÉOLOGIE AU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE

PARIS
V^VE CH. DUNOD, ÉDITEUR
Libraire des Corps des Ponts et Chaussées, des Mines et des Télégraphes
49, QUAI DES AUGUSTINS, 49

1887

Tous droits réservés

IMPRIMERIE A. LAHURE
9, RUE DE FLEURUS, 9

LES

EAUX SOUTERRAINES

AUX ÉPOQUES ANCIENNES

RÔLE QUI LEUR REVIENT DANS L'ORIGINE ET LES MODIFICATIONS
DE LA SUBSTANCE DE L'ÉCORCE TERRESTRE

PAR

A. DAUBRÉE

MEMBRE DE L'INSTITUT
INSPECTEUR GÉNÉRAL DES MINES EN RETRAITE, DIRECTEUR HONORAIRE DE L'ÉCOLE NATIONALE DES MINES
PROFESSEUR DE GÉOLOGIE AU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE

PARIS
Vve CH. DUNOD, ÉDITEUR
Libraire des Corps des Ponts et Chaussées, des Mines et des Télégraphes
49, QUAI DES AUGUSTINS, 49

1887

Tous droits réservés

3° Le pic de Buron, dyke basaltique renfermant des nodules de mésotype, et parfois de la mésotype cristallisée;

4° Chantourgues et les Côtes, au nord et près de Clermont. Le basalte, qui couronne ces masses calcaires, renferme parfois des nodules de mésotype, ainsi que de l'aragonite;

5° Le puy de Charade, au-dessus de Gravenoire;

6° La montagne de Gergovia, dont les basaltes et les pépérines du sud et du sud-est renferment de la chaux carbonatée, de plusieurs variétés cristallines, de l'aragonite blanche, rose et mamelonnée, de la mésotype, de la christianite et des veines d'opale grossière;

7° Les basaltes compacts du Broc, qui recèlent de la mésotype;

8° Le puy de Marman, composé de tuf calcaire, ainsi que de pépérine et de basalte, qui renferment de la mésotype, de l'analcime et de la chaux carbonatée. Ce puy est célèbre par les géodes volumineuses de mésotype qu'on y a trouvées, surtout dans le basalte : l'analcime y est beaucoup plus rare;

9° Le puy de Montaudon renferme de la calcédoine, de la chaux carbonatée cuboïde et de la chabasie;

10° Le Mont-Dore, dans les basaltes duquel existent de l'analcime, de la stilbite et d'autres zéolithes; l'andésite de la Croix Morand en est imprégnée;

11° Le puy de Mur, ou puy de Dallet, sur la rive droite de l'Allier, près Pont-du-Château. Au sommet, à l'ouest et à l'est de Mezel, le basalte contient des nodules de mésotype. Quelquefois une partie des tufs basaltiques est cimentée par cette zéolithe;

12° Murols, dont le château est bâti sur un pic de basalte, dans lequel on a cité de la mésotype avec de la calcite.

13° Le puy de la Piquette, au nord-ouest et près de Monton, sur la route du Cendre à Saint-Amand-de-Tallende, qui est un monticule composé de pépérite, traversé par des

filons de basalte. Il se trouve parfois, dans le tuf, des rognons d'un calcaire à phryganes et à ampullaires, très compact et très dur, qui renferment de la mésotype, ordinairement aciculaire, mais quelquefois en cristaux assez gros; elle est accompagnée de petits cristaux limpides ou d'un blanc nacré, d'apophyllite et de cristaux de calcaire. On a trouvé également dans cette pépérite du bois charbonné, entouré d'une croûte de mésotype lamellaire;

14° Saint-Sandoux, au-dessus du château. Au nord, s'élève un rocher, formé de beaux prismes basaltiques, divergeant en éventail, où l'on a mentionné de la mésotype;

15° Aux environs d'Issoire, le vaste plateau de la Chaux de Bergonne, où la dolérite s'est épanchée sur le calcaire, a fourni, au contact de ces deux roches, de la christianite ou phillipsite, de la phacolite et du mésole (variété de thomsonite globulaire);

16° Les scories, les basaltes amygdaloïdes et les basaltes compacts du puy situé à 2 kilomètres de Champeix renferment à la fois la mésolite et la christianite, avec concrétions calcaires et aragonite;

17° Le basalte bien connu des plateaux de Prudelles renferme de la laumonite et de la christianite;

18° La christianite a été de même retrouvée à Aubières et aux Côtes et, comme à Gergovia, dans les vacuoles de basalte, avec calcite et aragonite;

19° Au puy de la Poix, bien connu par le bitume et la calcédoine, accompagnée de quartz cristallisé, qui imprègne la pépérite, M. Julien a découvert de la giobertite, ainsi que de la mésotype, en petits cristaux un peu souillés de bitume;

20° Enfin les laves doléritiques du Puy de Dôme et de Gravenoire ont présenté à de Lasaulx des matières zéolithiques, ce qui est rare dans les coulées aussi récentes.

Dans tous ces gisements, la christianite est particulière-

ment fréquente. Il en est de même pour les basaltes de la Loire[1].

D'après M. Lory[2], tous les spilites, réduits en poudre fine, font effervescence avec les acides et trahissent ainsi la présence de carbonates intimement disséminés dans leur pâte, quelquefois dans la proportion de plus de 10 pour 100. La dissolution renferme de la chaux, avec un peu de magnésie et de fer. Ces roches sont également mélangées d'un silicate hydraté d'alumine, de magnésie et de fer voisin de la *terre-verte*, plus rarement de sidérose, de quartz et d'épidote. On sait que ces spilites, désignés depuis longtemps sous le nom de variolite du Drac, se sont épanchés dans les calcaires du lias, où les mêmes minéraux se présentent en nodules.

Dans son étude approfondie des mélaphyres amygdaloïdes des Vosges, Delesse[3] a reconnu des faits analogues. Des nodules de chaux carbonatée atteignant parfois plusieurs décimètres, ainsi que d'autres formés de quartz, se rencontrent souvent vers la limite des massifs. La chaux carbonatée est ordinairement accompagnée de terre-verte (delessite), quelquefois d'épidote et de quartz. On trouve 2 à 3 pour 100 d'eau dans la pâte de ces roches amygdaloïdes, qui se rattachent au porphyre vert antique, autrefois exploité à Giromagny, comme pierre d'ornement.

Le massif montagneux de l'Esterel, département du Var[4], présente un autre exemple à mentionner. Postérieurement à la sortie du porphyre feldspathique, qui est associé au grès bigarré, il est survenu dans cette contrée des éruptions de mélaphyres, qui forment autour des massifs porphyriques une ceinture non interrompue (fig. 2).

[1] Gonnard. *Comptes rendus*, t. XCVIII, p. 841, 1864.
[2] *Dauphiné*, p. 130.
[3] *Annales des mines*, 4e série, t. XII, p. 105, 1847.
[4] Coquand. Terrains primaires et ignés du département du Var. *Mémoires de la Société géologique de France*, 2e série, t. III, 1849.

En beaucoup de points, ce mélaphyre prend graduellement la structure amygdaloïde et ses noyaux sont formés, tantôt de calcite, tantôt de dolomie, tantôt de quartz à divers états.

Dans la rade d'Agay, à la presqu'île de Darmont, la roche se présente à l'état boursouflé. Elle est criblée de nombreuses cavités, à parois lisses, de forme généralement ellipsoïdale, tantôt communiquant entre elles, tantôt séparées,

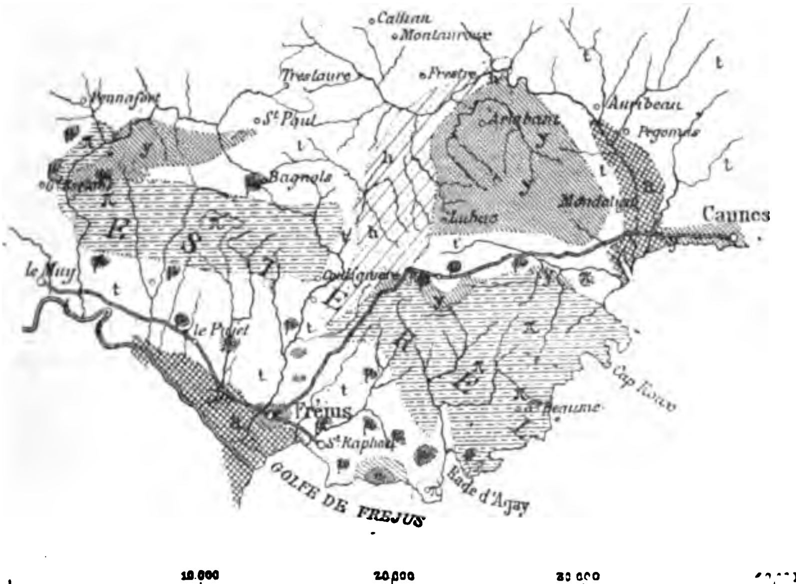


Fig. 2. — Carte géologique des montagnes de l'Esterel et environs, montrant les pointements de mélaphyre ω, en partie amygdaloïdes, qui forment comme une ceinture autour des massifs porphyriques π et granitiques γ. *h*, terrain houiller; *t*, grès bigarré; *a*, alluvions. — D'après Coquand.

qui sont évidemment dues à la fuite de gaz et de vapeurs, au moment du refroidissement de la masse. Non loin de là, à Boulouris, ces cavités ont été remplies et transformées en amygdales calcaires. C'est la variété la plus répandue dans cette région, particulièrement aux environs de Fréjus, à Curebiasse, sur la côte de Saint-Raphaël, à Boulouris, le long de la route postale entre l'auberge de l'Esterel et le pont de l'Argentière, à Esclans et à Bagnols. Les amygdales cal-

caires, de la grosseur moyenne d'un pois, sont généralement enveloppées d'une pellicule verdâtre, sans doute due à la décomposition du pyroxène de la masse. Parfois la roche ressemble extrêmement aux variolites du Drac.

En même temps que le carbonate de chaux, des nodules d'agate et de quartz cristallin se rencontrent dans les roches amygdaloïdes, depuis la Grande-Bastide, sur la côte de la rade de Giens, jusqu'au cap Garonne.

Une variété beaucoup moins répandue que les précédentes, où l'on trouve des agates, comme à Oberstein, se rencontre dans la vallée du Reyran, à Grane, qui est célèbre par le grand nombre d'échantillons de collection qu'elle a fournis (au quartier du Grand-Gondin près Fréjus et dans une colline au nord du château d'Agay). Les roches qui les renferment sont toujours à l'état terreux. Le quartz est souvent cristallisé et avec la couleur améthyste ; il est aussi à l'état de calcédoine, à zones concentriques et de diverses couleurs : bleu, rose, rouge, blanc, jaune (sardoine), orangé, rouge corail (cornaline). On y trouve aussi du jaspe rubané, de colorations variées.

Le petit massif volcanique du Kaiserstuhl qui s'élève au milieu de la plaine du Rhin, à la hauteur de Schlestadt, présente des roches pyroxéniques, souvent boursouflées, comme on l'a dit plus haut. Allongées suivant le sens de l'épanchement, elles abondent surtout près de la surface, diminuent progressivement et disparaissent dans la profondeur[1]. Rarement elles sont restées vides; très souvent elles sont enduites de terre verte et elles contiennent de la calcite, de la dolomie, particulièrement dans le mamelon de Vieux-Brisach, et en outre des zéolithes, en quelques points de

[1] Fischer, *Jahrbuch der Mineralogie*, 1865. Études pétrographiques de M. Rosenbuch, *Jahrbuch der Mineralogie*, 1873, p. 35-135.

l'opale de la variété hyalite; ces mêmes minéraux y constituent des veines.

Depuis l'antiquité, les roches du Palatinat, surtout celles des environs d'Oberstein et d'Idar, sont célèbres par les agates qu'elles renferment. Le quartz s'y trouve aussi à l'état de calcédoine, de cornaline, d'améthyste, parfois à l'état d'opale. Il y est accompagné de calcite qui est l'espèce la plus abondante, de dolomie, de sidérose et de zéolithes, telles que la chabasie, l'harmotôme, l'analcime, la stilbite et la prehnite, qui sont en général superposées au quartz. On y trouve, en outre, plusieurs variétés de terre-verte enveloppant la calcite, de l'oligiste, de la goethite et du cuivre natif. La pâte du porphyre lui-même est hydratée et imprégnée de carbonate, 3 pour 100, comme l'a reconnu Delesse.

Un nodule de dimension exceptionnelle, 1 mètre sur $0^m,40$, était aplati, allongé et terminé en pointe, de manière à avoir la forme d'une bulle de gaz qui se serait dégagée lentement dans une substance visqueuse.

Les roches amygdaloïdes (hypérites) subordonnées aux couches dévoniennes du Nassau et en partie connues sous le nom de schaalstein, ont d'autant plus attiré l'attention qu'elles sont souvent associées à des gîtes métallifères. Outre la calcite et le quartz, on y trouve souvent des zéolithes, analcime, stilbite, ainsi que de la terre-verte et de l'épidote.

D'après M. Von Dechen, ces mêmes roches amygdaloïdes se trouvent en Westphalie, dans la contrée de Brilon, associées de la même manière à des porphyres labradoriques.

Le basalte du Siebengebirge ne présente pas seulement des zéolithes et leurs compagnons minéralogiques ordinaires dans ses vacuoles, mais aussi en association intime avec sa pâte de labrador et d'augite. Elles y sont accompagnées

d'une quantité exceptionnellement considérable de carbonates, calcique, ferreux et magnésien, 23 à 28 pour 100, d'après une analyse de Bergemann [1].

Sur la rive droite du Rhin, en Vétéravie, les basaltes sont souvent boursouflés, surtout vers leurs bords; ils renferment des zéolithes qui imprègnent également les parties compactes; d'après Tasche [2], la pâte de la roche donne 4,9 pour 100 d'eau.

La structure amygdaloïde est fréquente dans toutes les roches pyroxéniques qui sont si développées dans le Tyrol méridional et que les études de Léopold de Buch ont rendues classiques. On sait que leurs puissantes éruptions se sont succédé pendant la période du trias supérieur.

Les boursouflures de ces roches éruptives sont tantôt vides, tantôt remplies de zéolithes, analcime, apophyllite, mésotype, laumonite, thomsonite, prehnite, ainsi que de datholite, de quartz calcédoine, d'améthyste, de terre-verte qui parfois s'est substituée au pyroxène, enfin de calcite et d'aragonite. La couleur verte qui y est habituelle résulte d'une altération générale, en rapport avec l'origine des zéolithes [3].

La vallée de Fassa et l'alpe de Seiss sont particulièrement remarquables à cet égard, ainsi que l'attestent toutes les collections de minéralogie. La figure 3 donne une coupe de cette dernière, passant par Cipit, l'un des points où abondent les zéolithes. Les tufs éruptifs sont souvent eux-mêmes amygdaloïdes, comme à Bufaure; ils contiennent en quantité considérable des nodules de quartz calcédoine, d'opale et de calcite.

[1] Von Dechen, *Siebengebirge*, 2e édition, p. 140 et 161.
[2] Texte de la section de Schotten, p. 58.
[3] Von Richthofen, Tyrol, 1860. De Lapparent, *Annales des mines*, 6e série, t. V, 1864.

Les basaltes du Mittelgebirge de la Bohême ont aussi très souvent une structure amygdaloïde, avec les associations minéralogiques habituelles[1].

Au point de vue de la formation des zéolithes, on peut citer le Vicentin, où se rencontrent les rognons bien connus de calcédoine enhydres, c'est-à-dire contenant de l'eau liquide, et la Sicile. Les beaux échantillons d'analcime des îles Cyclopes se trouvent dans les dolérites épanchées sur des marnes. Ces dolérites sont rarement compactes : presque

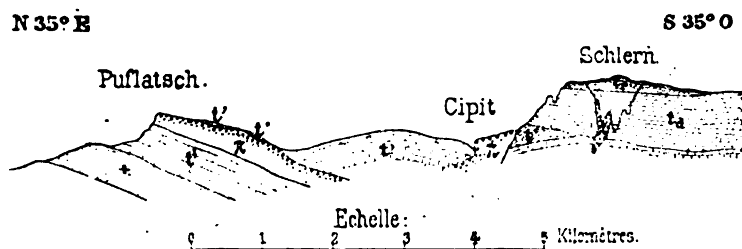


Fig. 3. — Coupe de l'alpe de Seiss, montrant la position de Cipit et d'autres localités, où se sont développées les parties amygdaloïdes des mélaphyres. *t*, schiste du trias inférieur ; *t'*, trias supérieur ; *π*, porphyre augitique ; *td*, dolomie du Schlern ; *t*, schiste de Raibl. — D'après M. von Richthofen.

partout elles sont criblées de cavités dont la dimension atteint de 50 à 70 millimètres.

La région nord-est de l'Irlande, particulièrement les comtés d'Antrim et de Londonderry[2], classiques par les grandes nappes de roches basaltiques qui se sont étendues à la surface de la craie, avec des épaisseurs dépassant 200 mètres, offre aussi de nombreux exemples de la formation des minéraux zéolithiques, avec des circonstances de gisement tout à fait semblables à celles que nous avons déjà signalées. On y trouve l'analcime, l'apophyllite, la stilbite, la phillipsite, la brewsterite, la chabasie, l'harmotôme, la laumonite, la

[1] A.-E. Reuss, *Die Umgebungen von Teplitz*, 1840.
[2] Portlock, *Geology of County of Londonderry*, 1843.

mésotype, la terre-verte, la lithomarge, la calcédoine, l'opale et la calcite.

Il en est de même dans l'Écosse occidentale, y compris les îles, où les roches éruptives sont également très développées[1].

Les minéraux zéolithiques se trouvent avec une abondance exceptionnelle dans les îles Feroë, au nombre de dix-sept, qui sont formées de roches pyroxéniques, massives et le plus souvent à l'état de tuf ou de conglomérat. Elles constituent des nappes nombreuses, superposées sur des épaisseurs de 800 mètres, ainsi que d'imposantes falaises séparées les unes des autres par des canaux étroits où s'engouffre la mer (fig. 4). Ces minéraux se trouvent en géodes, en nids, en vessies, principalement concentrés sur les lignes séparatives de la roche massive et des tufs. Nelsoë est particulièrement à citer à ce point de vue[2].

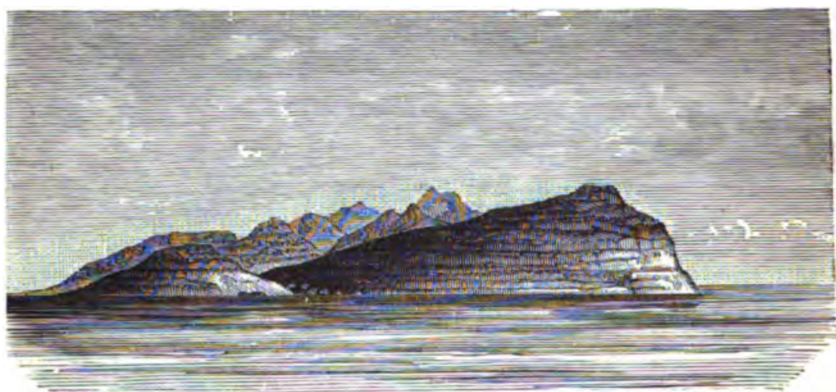


Fig. 4. — Vue de l'île Nelsoë et des îles environnantes, prise en mer, dans le détroit qui le sépare de Stromoë. — D'après Durocher.

L'Islande ne le cède à aucune région de l'Europe pour le développement des roches amygdaloïdes et des minéraux

[1] Geikie, *Quarterly journal*, t. XXVII, 1871. Judd et Allport, même recueil, t. XXX, 1874.

[2] Durocher, *Annales des mines*, 3e série, t. XIX, 1841, et 4e série, t. VII, p. 437.

zéolithiques. M. Bunsen a étudié particulièrement ce gisement[1]. Les silicates hydratés des tufs avec palagonite, également très abondants, s'y rattachent étroitement par leur histoire; il y a entre eux des passages graduels. Ces faits peuvent s'observer sur des couches de tuf de 300 à 400 mètres d'épaisseur. Les échantillons de spath calcaire

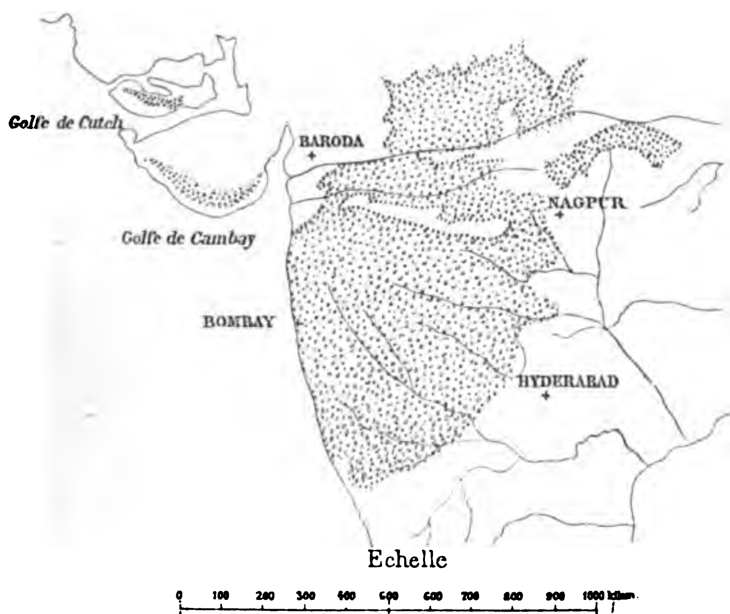


Fig. 5. — Carte montrant l'extension de snappes trapéennes du Dekkan, que représente la partie en pointillé. — D'après la carte du *Geological survey* de l'Inde.

d'une limpidité parfaite, que l'Islande fournit presque exclusivement aux physiciens, se trouvent dans des cavités semblables à celles qui ont fourni les zéolithes, comme l'a reconnu M. des Cloizeaux[2] : les cristaux sont souvent recouverts de stilbite.

L'un des plus grands massifs basaltiques du globe et qui

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série. t. XXXVIII, p. 215, 1855.
[2] *Bulletin de la Société géologique*, 2e série, t. IV, p. 768.

bre, ainsi que leurs conglomérats, parallèlement aux couches siluriennes. Les parties supérieures de ces nappes, dont l'épaisseur varie de 5 à 30 mètres, sont caractérisées, d'après M. Raphaël Pumpelly[1], par l'état boursouflé de la roche, qui de compacte devient graduellement amygdaloïde. Les cavités sont rarement restées vides et contiennent d'abondants zéolithes: heulandite, stilbite, mésotype, analcime, prehnite, auxquels sont associés la datholite, l'espèce de chlorite nommée delessite, de l'épidote, du quartz surtout à l'état d'agate, de la calcite, du cuivre natif en masses pesant parfois plusieurs kilogrammes.

La Nouvelle-Écosse (baie de Fundy), le New-Jersey, le Connecticut, la Pennsylvanie et la Caroline du Nord, où des mélaphyres sont associés à des couches triasiques, ont été l'objet de très intéressantes études[2]. Ils paraissent postérieurs au trias et peut-être au terrain jurassique[3].

A ces roches trappéennes sont associées, sur des milliers de kilomètres, des roches amygdaloïdes, par exemple dans la vallée du Connecticut, à l'est du West-Rock, d'après M. Édouard Dana. En même temps la pâte est hydratée et contient un minéral vert, chloritique, formé aux dépens de l'augite.

La roche conserve les mêmes caractères sur de grandes étendues, de East-Haven à travers les montagnes de Durham et de Middletown jusqu'à Berg-Town. Dans les nombreuses boursouflures des amygdaloïdes se trouvent : la calcite, le quartz, la chlorite, quelquefois la datholite et

[1] *American journal*, 3e série, t. II, p. 194-243 et 347, 1872. — Jackson, *Annales des Mines*, 4e série, t. XVII, p. 104. — Logan, *Geology of Canada*, p. 67 à 86. — Rivot, *Annales des Mines*, 5e série, t. VII, p. 173. — James Dana, *American journal*, 1880, t. XX, p. 330 à 332. — Wadsworth, *Proceedings of Boston natural history*, t. XXI, p. 91, 1881.

[2] Jackson et Alger, *Sillimann's journal*, t. XIV, p. 301 et t. XV. p. 132 et 201. — Marsh, même journal, t. XXXV, p. 210, 1863. — *Jahrbuch für Mineralogie*, 1875.

[3] Dana, *Geology*, p. 452.

amygdaloïdes, dans lesquelles des nodules formés de zéolithes et d'agate constituent parfois la plus grande partie de la roche. Ces nodules sont très souvent enduits de terre-verte ou glauconite et la prédominance de cette dernière espèce est éminemment caractéristique. Les minéraux secondaires, c'est-à-dire formés depuis la consolidation de la roche, ne forment pas seulement des nodules, mais aussi des veines. Les plus communs sont : le quartz, soit cristallisé, soit à l'état d'agate, soit à celui de jaspe, quelquefois sanguin ; la stilbite, l'apophyllite, la heulandite, la scolézite (poohnalite), la laumonite et la calcite. La thomsonite, l'épistilbite, la prehnite et la chabasie sont rares. Le quartz cristallisé est ordinairement à l'état d'améthyste; les agates sont souvent à zones fines, et, après avoir été colorées artificiellement par la chaleur, elles sont taillées comme pierres d'ornement. La stilbite est particulièrement commune, mais moins que le quartz.

Beaucoup des nappes essentiellement amygdaloïdes ont seulement de 2 à 3 mètres d'épaisseur. C'est, comme à l'ordinaire, vers le haut que les amandes abondent; il y en a moins dans le milieu et vers le bas, la roche est traversée par des tubulures longues, cylindriques, verticales et remplies avec des zéolithes. Ces tubulures résultent probablement de ce que la couche sous-jacente, échauffée par la coulée de roche qui s'étendait à sa surface, a exhalé des gaz ou de la vapeur à travers celle-ci, lorsqu'elle etait déjà à peu près consolidée.

Ces basaltes paraissent être comparativement très anciens, et remonter au moins à l'époque éocène.

Dans peu de contrées la formation des zéolithes se montre sur d'aussi grandes proportions qu'aux environs du lac Supérieur, tant dans le Canada que dans les États-Unis.

Les couches de mélaphyre y sont étalées en grand nom-

bre, ainsi que leurs conglomérats, parallèlement aux couches siluriennes. Les parties supérieures de ces nappes, dont l'épaisseur varie de 5 à 30 mètres, sont caractérisées, d'après M. Raphaël Pumpelly[1], par l'état boursouflé de la roche, qui de compacte devient graduellement amygdaloïde. Les cavités sont rarement restées vides et contiennent d'abondants zéolithes : heulandite, stilbite, mésotype, analcime, prehnite, auxquels sont associés la datholite, l'espèce de chlorite nommée delessite, de l'épidote, du quartz surtout à l'état d'agate, de la calcite, du cuivre natif en masses pesant parfois plusieurs kilogrammes.

La Nouvelle-Écosse (baie de Fundy), le New-Jersey, le Connecticut, la Pennsylvanie et la Caroline du Nord, où des mélaphyres sont associés à des couches triasiques, ont été l'objet de très intéressantes études[2]. Ils paraissent postérieurs au trias et peut-être au terrain jurassique[3].

A ces roches trappéennes sont associées, sur des milliers de kilomètres, des roches amygdaloïdes, par exemple dans la vallée du Connecticut, à l'est du West-Rock, d'après M. Édouard Dana. En même temps la pâte est hydratée et contient un minéral vert, chloritique, formé aux dépens de l'augite.

La roche conserve les mêmes caractères sur de grandes étendues, de East-Haven à travers les montagnes de Durham et de Middletown jusqu'à Berg-Town. Dans les nombreuses boursouflures des amygdaloïdes se trouvent : la calcite, le quartz, la chlorite, quelquefois la datholite et

[1] *American journal*, 3e série, t. II, p. 194-243 et 347, 1872. — Jackson, *Annales des Mines*, 4e série, t. XVII, p. 104. — Logan, *Geology of Canada*, p. 67 à 86. — Rivot, *Annales des Mines*, 5e série, t. VII, p. 173. — James Dana, *American journal*, 1880, t. XX, p. 330 à 332. — Wadsworth, *Proceedings of Boston natural history*, t. XXI, p. 91, 1881.

[2] Jackson et Alger, *Sillimann's journal*, t. XIV, p. 301 et t. XV. p. 132 et 201. — Marsh, même journal, t. XXXV, p. 210, 1863. — *Jahrbuch für Mineralogie*, 1875.

[3] Dana, *Geology*, p. 452.

l'analcime, plus rarement le bitume. Le cap Blomidon, en Nouvelle-Écosse, est célèbre par ses minéraux zéolithiques. Ces amygdaloïdes forment de longues rides parallèles aux masses principales des trapps, ou les enveloppent concentriquement.

Les rognons d'agate avec cornaline et améthyste, souvent aquifères, de la Confédération Argentine, qui sont expédiés du Haut-Uruguay (Salto) en Europe, en quantités très considérables depuis quelques années[1], sont venus se substituer aux produits des anciennes extractions d'Oberstein. Ils proviennent de roches amygdaloïdes rappelant celles d'Oberstein.

Il en existe aussi au Brésil dans la province de San-Pedro-do-Sul.

[1] 200 000 kilogrammes en 1862.

CHAPITRE II

ZÉOLITHES EN DEHORS DES ROCHES AMYGDALOIDES

Quoique tout particulièrement développées dans les roches amygdaloïdes, les zéolithes ne s'y sont pas particulièrement cantonnées.

Certains phonolithes sont traversés par d'innombrables veines zéolithiques, comme si ces silicates hydratés provenaient d'une simple exsudation de la roche. On le reconnaît souvent sur de simples échantillons de collection, tel qu'en fournissent le Hohentviehl dans le Hœhgau et diverses localités de Bohême. Le fait se voit mieux encore sur le front de taille des grandes carrières d'Oberschaffhausen, au Kaiserstuhl.

Quelquefois les zéolithes ont passé des masses éruptives dans les roches stratifiées empâtées ou avoisinantes. Outre l'exemple bien connu du Puy de la Piquette, nous signalerons le fait observé par Sartorius von Waltershausen, aux îles Cyclopes[1].

Sur un point de ces îles, la roche cristalline, qui s'élève de 10 à 15 mètres au-dessus du niveau de la mer, est re-

[1] *Der Ætna*, p. 55.

couverte par des couches de marne, que traversent quatre filons de dolérite (fig. 7). Près de son contact avec le basalte, la marne contient d'innombrables veinules tapissées de petits cristaux d'analcime et de quelques autres minéraux. Leur épaisseur varie de celle d'une feuille de papier jusqu'à plusieurs millimètres. Les minéraux qu'elles contiennent paraissent s'être formés, en même temps que les mêmes espèces se produisaient dans la roche éruptive voisine.

Parmi les gisements remarquables de zéolithes, il con-

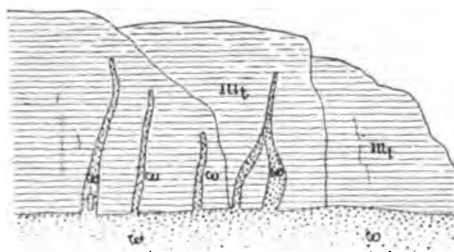


Fig. 7. — Profil de la côte occidentale des îles Cyclopes, montrant des filons de dolérite ω, ω, ω, ω, dans les couches de marnes tertiaires m_t. — D'après Sartorius von Waltershausen.

vient de signaler le lignite de l'île de Kerguelen, en Océanie, qui en est imprégné, d'après l'analyse qu'en a donnée le docteur Percy[1]. On sait que ce lignite qui est tertiaire, est associé à des roches volcaniques.

Ailleurs, c'est dans des gîtes métallifères que des zéolithes se sont formées.

Tels sont les filons d'Andreasberg au Hartz; ceux de Kongsberg en Norwège; ceux de Huelgoat en Bretagne, où se rencontre la laumonite; les amas filoniens du Banat (Cziclowa); l'amas de fer d'Utö, en Suède; les petits filons titanifères et autres du massif du Saint-Gothard et ceux de l'Oisans avec leur prehnite.

[1] *Metallurgy*, Fuel, p. 418.

Au lac Supérieur, les filons métallifères, principalement cuivreux, qui traversent les nappes de mélaphyre, contiennent eux-mêmes, aussi bien que les roches amygdaloïdes voisines, des zéolithes, particulièrement la laumonite, ainsi que l'épidote et la chlorite. On sait que ces filons sont particulièrement riches lorsqu'ils traversent ces roches. Le cuivre natif se trouve souvent disséminé dans la prehnite. Divers minéraux métalliques sont enchevêtrés au milieu des zéolithes, de manière à montrer que les uns et les autres se sont produits à peu près dans les mêmes circonstances.

CHAPITRE III

MODE DE FORMATION DES ZÉOLITHES ET DES MINÉRAUX CONNEXES

§ 1. LUMIÈRES FOURNIES PAR LES CONDITIONS DU GISEMENT.

Comme on vient de le voir, les caractères des zéolithes démontrent que ces combinaisons se sont développées dans les boursouflures et autres cavités des roches, postérieurement à la consolidation.

Toutes ces zéolithes : stilbite, heulandite, chabasie, mésotype, analcime, christianite et autres espèces, se rencontrent associées, non seulement dans le même massif, mais souvent dans une même cavité.

D'autres minéraux qui les accompagnent se sont visiblement formés dans les mêmes conditions. Le plus important de ces minéraux connexes est le quartz, tant à l'état cristal lisé que sous les formes d'agate et de calcédoine. Ses compagnons sont l'opale, différentes espèces de terre verte ou chlorite (delessite, céladonite, chlorophæite), la lithomarge, la stilbite, la datholite, l'épidote, ainsi que la calcite, l'aragonite, la sidérose; enfin et plus rarement, la vivianite, la barytine, la célestine, la fluorine, le cuivre natif. On peut

citer encore la limonite, la goethite, l'oligiste et le manganèse oxydé.

D'après les exemples de gisement qui ont été cités plus haut, les zéolithes et les principaux minéraux connexes, sont loin de constituer des accidents restreints.

D'abord les noyaux que ces substances constituent, en raison de leur volume et de leur nombre, forment quelquefois une fraction considérable de la roche. Il en est ainsi à

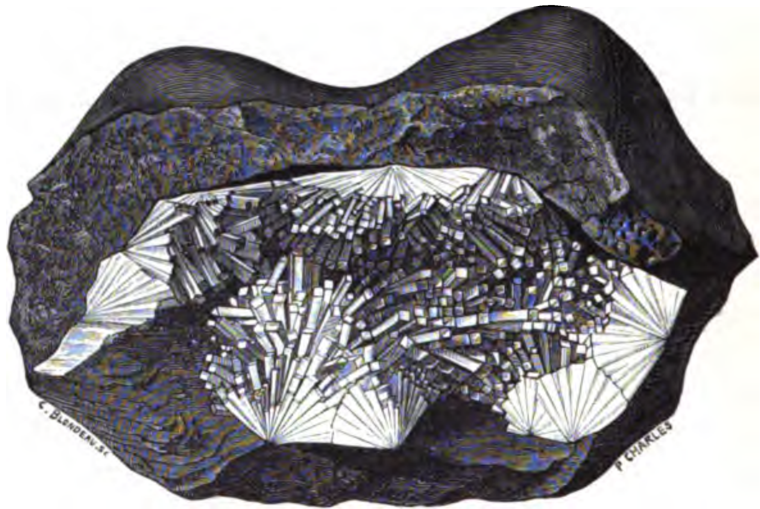


Fig. 8. — Géode de mésotype dans une roche amygdaloïde. De la collection du Muséum. Moitié de grandeur naturelle.

l'île de Skye, où la stilbite est en nids de 1m,30 à 1m,50. De même aux îles Cyclopes, où abonde l'analcime sous forme de noyaux et de veines, dans le Mittelgebirge, dans les Feroë, en Islande et dans bien d'autres localités. La figure 9 représente une géode dans laquelle les cristaux sont particulièrement volumineux.

Même quand ces noyaux sont beaucoup plus petits, les minéraux qui nous occupent sont tellement abondants dans certaines parties de la roche qu'ils en forment une proportion très notable. La vue seule y décèle souvent la présence

de zéolithes, non moins sûrement que l'analyse chimique. Dans tous les cas, les zéolithes se reconnaissent dans les tranches minces de ces roches, lorsqu'on les examine au microscope (basalte du Donnersberg et autres localités de la Bohême).

Les minéraux connexes des zéolithes peuvent, de même que ces dernières, acquérir aussi une grande importance dans la constitution des roches éruptives. Tels sont particulièrement les carbonates de chaux, de magnésie et de fer. Il y a longtemps que M. Boussingault remarquait, dans la région des Andes qu'il a explorée si utilement pour la science, que les roches cristallines font effervescence, à peu d'exceptions près. De même la pâte des spilites du Drac, réduite en poudre fine, cède quelquefois à un acide faible plus d'un dixième de son poids; de la chaux se dissout alors avec un peu de magnésie et de fer[1]. A Obercassel près Bonn, la sidérose ne se montre pas seulement dans les géodes du basalte, comme à Steinheim près Hanau, mais aussi dans la pâte, où elle est associée à une forte proportion de zéolithes. D'autres basaltes du Siebengebirge, de la Vétéravie et de diverses localités annoncent des mélanges semblables de carbonates avec des zéolithes[2].

Les principaux caractères des agates sont trop connus

[1] Gueymard, *Annales des Mines*, 4e série, t. XVIII. — Lory, *Isère*, p. 136.
[2] Von Dechen, *Siebengebirge*, 2e édition, p. 149.
Le basalte d'Obercassel a donné à Bergemann la composition suivante :

Labrador	28
Pyroxène	16.5
Fer oxydulé	7.5
Carbonates de chaux, de magnésie et de protoxyde de fer	23
Minéraux zéolithiques	25
	100

Mittelrheinische geologische Karte. Texte : Schotten, p. 52 à 57; Alsfeld, p. 21; Lauterbach, p. 64.

pour qu'il soit nécessaire de les rappeler ici autrement que d'une manière très succincte.

Les couches concentriques nombreuses et minces qui les constituent en général, comme dans les agates zonées, annoncent un dépôt graduel de la silice, qui s'est appliquée successivement sur les parois en se moulant sur elles. Le dépôt varie souvent d'une couche à l'autre, soit par un mélange qui les colore, soit par des différences dans l'état cristallin. Parfois on distingue un canal par lequel s'est introduite la silice, comme par une sorte d'entonnoir (fig. 9), mais c'est un cas exceptionnel[1]. Le plus souvent, la substance paraît avoir pénétré par les pores mêmes. L'expérience montre d'ailleurs que la pâte de ces roches amygdaloïdes, quelque compacte qu'elle paraisse, est perméable à l'eau. Cette porosité contribue aux suintements des galeries d'exploitation qui y sont pratiquées.

Les rognons d'agate n'ont pas toujours été complètement remplis, et, dans ce cas, le centre est occupé par du quartz cristallisé, lequel appartient très souvent, par sa couleur violacée, à la variété améthyste (fig. 10).

De même que les zéolithes, les agates se présentent avec des caractères identiques dans des contrées très différentes. Celles que renferment les amygdaloïdes du lac Supérieur ont les plus grandes ressemblances avec celles d'Oberstein, du Haut-Uruguay et de la province de San-Pedro du sud, au Brésil.

Dans certains pays, comme aux Feroë, c'est la variété de quartz calcédoine, habituellement incolore, qui s'est déposée de préférence. Elle y affecte non seulement des formes mamelonnées bien connues, mais aussi la disposition

[1] On peut consulter sur ce sujet, par exemple, Zirkel, *Petrographie*, t. p. 88 ; Bischof, t. I, p. 623 et suivantes.



Fig. 9. — Agate montrant un canal, par lequel l'eau incrustante a particulièrement pénétré dans la vacuole de la roche amygdaloïde. — D'après un échantillon du Muséum. Grandeur naturelle.

en stalactites, qui se sont allongées verticalement sous l'action de la pesanteur, comme les stalactites calcaires.

Dans certaines roches amygdaloïdes, l'acide silicique ne s'est pas déposé à l'état anhydre ou de quartz, mais à l'état d'hydrate, c'est-à-dire d'opale. Parmi les localités où on rencontre l'opale, on peut rappeler le Siebengebirge et l'Écosse (Dumbarton).

Les zéolithes ne sont pas les seuls silicates hydratés qui



Fig. 10. — Géode tapissée de quartz agate, sur lequel se sont déposés des cristaux de quartz améthyste. L'intérieur de la cavité renferme, en outre, des cristaux volumineux de barytine. — Probablement d'Oberstein, Palatinat. — Échantillon du Muséum, 1/2 grandeur naturelle.

se soient déposés dans les cavités. Comme on l'a vu, on y rencontre très fréquemment aussi des silicates de couleur verte, principalement à base d'alumine et de protoxyde de fer, que l'on a confondus autrefois sous le nom de terre verte et que l'on distingue maintenant par différents noms, delessite, céladonite, chlorophæite; exemples à Monte Baldo près Vérone, au Tyrol, en Islande, etc.

Souvent la calcite a rempli complètement les cellules où elle est en masses confusément cristallines (variolite du

Drac, une partie des amygdaloïdes d'Oberstein, (fig. 11), toadstone de l'Angleterre, Blätterstein du Harz, Schaalstein du Nassau, Kalktrapp ; quelquefois un espace vide lui a permis de cristalliser et elle peut alors se présenter en volumineux cristaux (Oberstein). On sait que c'est dans ces con-

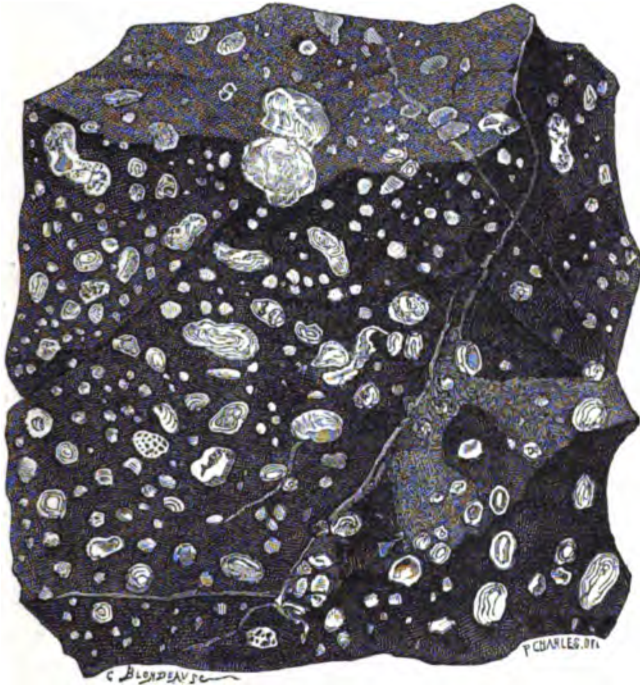


Fig. 11. — Amygdaloïde, dont les noyaux sont constitués par du quartz, en partie à l'état de cornaline, et de la calcite spathique, les deux substances souvent associées et disposées en couches concentriques. — D'Oberstein, Palatinat. Échantillon du Muséum 1/2 grandeur naturelle.

ditions qu'on rencontre, en Islande, ces masses limpides de spath, dont l'optique fait un si précieux usage.

Sans être aussi répandue que la calcite, l'aragonite est assez abondante, par exemple au Kaiserstuhl.

Le même massif basaltique est également remarquable par l'abondance de la dolomie; lorsqu'elle est associée à l'hyalite, cette dernière substance lui est superposée. La do-

lomie n'incruste pas seulement les cellules, elle forme aussi dans cette localité, des veines épaisses au milieu des conglomérats.

§ 2. — LUMIÈRE FOURNIE PAR L'ÉTUDE DE PHÉNOMÈNES CONTEMPORAINS.

C'est surtout en ce qui concerne la formation des zéolithes que l'on possède des données précises, qui confirment d'ailleurs les notions auxquelles nous venons d'être amenés par l'étude de leurs gisements.

En rencontrant des zéolithes disséminées à l'intérieur des roches volcaniques anciennes, et jusque dans leurs moindres cavités, on avait cru d'abord que ces minéraux se sont formés par ségrégation, dans la masse même de la roche, et qu'elles ont pu retenir leur eau à de hautes températures, sous l'influence de la pression. Plus tard, d'après de nombreuses observations, on fut conduit à admettre que les zéolithes ont été déposées par des infiltrations qui auraient pénétré dans les roches. Cependant dans les conditions ordinaires des laboratoires, on n'arrivait pas à reproduire, sous forme cristalline, des silicates hydratés. Aussi croyait-on qu'ils se sont formés à une température assez élevée et sous une pression qui ne permettait pas à leur eau de combinaison de se dégager.

Au lieu de conjectures, nous possédons maintenant une démonstration, pour ainsi dire expérimentale, qui caractérise bien des circonstances du phénomène.

La nature fait elle-même des expériences du genre de celles que nous n'exécutons qu'avec tant de difficultés ; elle emploie probablement des procédés analogues à ceux dont elle s'est servie depuis les temps les plus reculés. Malheu-

reusement ces réactions, qui sont particulièrement instructives, se produisent dans des régions plus ou moins profondes et imbibées d'eau thermale, où nous ne pouvons pénétrer que rarement.

Les Romains ont étendu, autour des points d'émergence des sources thermales qu'ils savaient aménager si habilement, une maçonnerie ou béton (blocage), composée de fragments de briques et de pierres (grès ou calcaire), réunis par un ciment de chaux. Dans diverses localités, on a eu occasion d'entailler ces maçonneries antiques qui, depuis des siècles, étaient immergées dans de l'eau minérale, douée d'une température plus ou moins élevée. On a reconnu alors que, dans certaines parties, ces masses avaient subi une action chimique et, par suite, une transformation très remarquable, tant au point de vue de la chimie et de la minéralogie qu'à celui de la géologie [1].

Conditions dans lesquelles se sont produits à Plombières les zéolithes, l'opale, le quartz calcédoine et d'autres minéraux.

C'est à Plombières que ces faits ont été observés pour la première fois. L'étendue et la profondeur des entailles, momentanément ouvertes dans cette localité, il y a une vingtaine d'années, ont permis d'y poursuivre les observations d'une manière très instructive.

Le béton qui a été appliqué à proximité des sources thermales s'étend sur plus de 100 mètres de longueur avec une épaisseur qui, sur quelques points, atteint 3 mètres (fig. 12 et 13). Cette nappe de maçonnerie repose en quelques points

[1] *Géologie expérimentale*, p. 180.

sur le granite même *g* ; mais en général, elle est séparée de la roche solide par du gravier d'alluvion. L'eau thermale *s* qui jaillissait dans le gravier se trouvait emprisonnée sous le béton, et en sortait par des cheminées verticales en pierre de taille, dans lesquelles elle s'élevait, pour s'écouler ensuite vers les piscines : de cette manière les infiltrations de la rivière, qui coule dans la

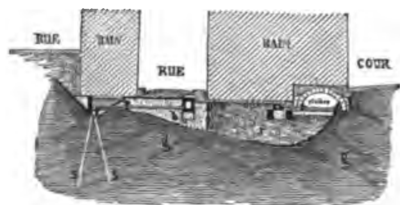


Fig. 12. — Disposition de la maçonnerie à zéolithes sous le sol de Plombières. Coupe transversale. *g*, granite du fond de la vallée, duquel jaillissent les sources thermales *s*, *s*; *b*, béton romain qui a servi à les isoler de la rivière voisine; *r*, remblai. Echelle de $\frac{1}{1000}$.

même nappe de gravier, étaient isolées de l'eau thermale.

Sous l'action prolongée de l'eau minérale, pénétrant continuellement dans le massif de béton, le ciment calcaire et les briques elles-mêmes ont été en partie transformés. Les combinaisons nouvelles qui se sont produites se montrent dans les cavités de la masse, et particulièrement dans les boursouflures des briques, où elles forment des enduits mamelonnés et quelquefois cristallisés. L'examen microscopique m'a



Fig. 13. — Coupe longitudinale de la ville de Plombières, sous laquelle les anciens ont étendu une nappe de béton, dans le but d'isoler les sources thermales de la rivière. Même signification des lettres et même échelle que dans la figure précédente.

fait reconnaître que les mêmes espèces minérales se sont aussi formées dans les moindres pores de ces matériaux.

Les combinaisons les plus remarquables sont des silicates hydratés, de la famille des zéolithes, et de l'acide silicique libre, à divers états.

Dans beaucoup de boursouflures des briques il s'est déposé des cristaux incolores, d'une limpidité parfaite, ayant la forme de rhomboèdres voisins du cube. De même que la plupart des cristaux de chabasie, ils sont faiblement striés parallèlement aux arêtes (fig. 14); ils en présentent parfois aussi la macle habituelle (fig. 15). La mesure des angles des

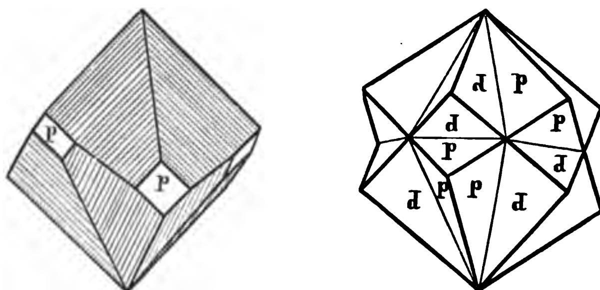


Fig. 14 et 15. — Formes de la chabasie produite par les sources thermales dans la maçonnerie de Plombières. On y voit les stries (fig. 14) et la macle (fig. 15) qui sont habituelles dans la chabasie des époques géologiques. Grossissement : environ 30 fois.

cristaux ne laisse aucun doute sur leur identité avec ceux de la chabasie; les caractères chimiques sont tout semblables.

Certaines fissures du ciment calcaire, ainsi que les briques, renferment des cristaux parfaitement transparents et incolores; leur forme est celle d'un prisme rectangulaire, surmonté d'un pointement pyramidal qui repose sur ses arêtes (fig. 16). D'après les angles que de Sénarmont a bien voulu mesurer, cette autre zéolithe est de l'harmotome à base de chaux, ou christianite.

D'après M. Des Cloizeaux, la christianite de Plombières

paraît identique à celle de Marbourg et à la phillippsite de la Somma. Ses cristaux seraient des pénétrations en croix de deux individus qui ne laissent entre eux aucun angle rentrant. Le plan des axes optiques est normal à la base *p* et à la face *g* de la forme primitive (prisme rhombique de 110°,15). La bissectrice aiguë positive est parallèle à la petite diagonale de la base.

La christianite accompagne ici la chabasie, absolument comme celle des trapps amygdaloïdes de l'Islande.

L'examen microscopique de la pâte des briques y a décélé

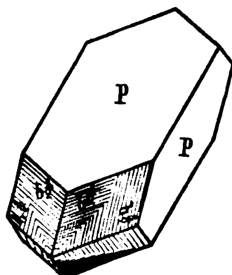


Fig. 16. — Forme de la christianite produite par les sources thermales dans la maçonnerie de Plombières. Comme dans les cristaux des époques géologiques, on y voit les stries, indice de la macle. Grossissement : environ 40 fois.

de la mésotype, bien reconnaissable à sa forme cristalline : elle se montre en prismes terminés par des bases perpendiculaires à l'axe et offrant une disposition radiée; ces cristaux ont une vive action sur la lumière polarisée (fig. 17). Après l'action de l'acide, ils laissent, comme résidu de l'attaque, des prismes de même forme, mais sans action sur la lumière polarisée, qui sont probablement les squelettes siliceux des premiers cristaux (longueur environ $0^{mm},1$ sur $0^{mm},2$ de largeur). La mésotype se présente exactement avec le même aspect dans les pores de certains basaltes : un échantillon des environs de Donnersberg, en Bohême, offre un exemple frappant de cette ressemblance.

Quelques géodes renfermées dans des fragments de calcaire sont intérieurement recouvertes de pointements en pyramide aiguë à base carrée. L'analyse m'a montré que cette substance est un silicate hydraté de potasse et de chaux, dans les proportions qui constituent l'apophyllite, minéral dont elle a d'ailleurs la forme cristalline. Chauffée dans un tube ouvert, elle donne même la réaction du fluor, comme les apophyllites naturelles.

Il s'est formé encore, dans les mêmes briques, d'autres

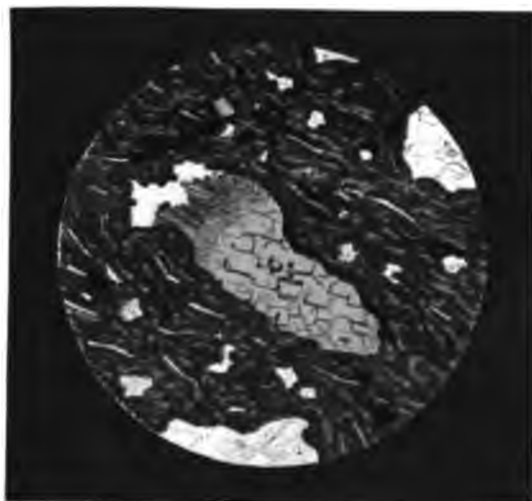


Fig. 17. — Brique zéolithique réduite en tranche mince et montrant la chabasie et la mésotype déposées en géode dans l'une des cavités, par l'eau thermale de Plombières; grossissement : 130 diamètres.

combinaisons de la famille des zéolithes; mais leur détermination n'a pas encore été faite avec certitude, parce qu'il est très difficile de les isoler complètement des briques et du béton, et qu'on n'a pu en recueillir, à l'état de pureté, que des quantités insignifiantes. Je ne les mentionne donc qu'avec réserve.

Les cristaux de chabasie sont fréquemment recouverts de petits globules, hérissés de cristaux microscopiques, qui ont tous les caractères de la variété de gismondine, à laquelle

on a autrefois donné le nom d'abrazite et qui se trouve abondamment dans les boursouflures de la roche volcanique de Capo di Bove, près Rome. On rencontre plus rarement des cristaux en aiguilles, qui ont l'aspect et les caractères chimiques de la scolézite. Souvent la zéolithe, étant amorphe, n'est pas susceptible d'être exactement définie.

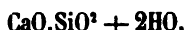
Les enduits de zéolithes cristallisées sont toujours très minces; leur épaisseur est inférieure à 1 millimètre.

Dans des cavités situées à la partie inférieure de la couche de maçonnerie, et à proximité des points qui reçoivent un jet direct d'eau thermale, il s'est produit assez abondamment des dépôts gélatineux, transparents et incolores. On les a surpris en voie de précipitation, dans les tranchées que l'on ouvrait au milieu des maçonneries imbibées d'eau. En se desséchant à l'air libre, la substance devient, au bout de quelques heures, opaque et d'un blanc de neige. Sa surface mamelonnée, ses couches concentriques, sa cassure fibreuse rappellent tout à fait la structure de la calcédoine, de la malachite, de l'hématite brune et d'autres espèces minérales concrétionnées. Elle fond facilement au chalumeau en bouillonnant; elle fait gelée avec les acides et présente les caractères d'un silicate. Selon les conditions de température dans lesquelles on la place successivement, elle perd ou elle gagne de l'eau, et paraît présenter des propriétés hygroscopiques semblables à celles que M. Damour a étudiées dans les zéolithes.

L'analyse a montré que cette substance est un silicate de chaux hydraté; un échantillon, après une dessiccation à 100 degrés, a été trouvé composé de :

Silice	40,6
Chaux	34,1
Alumine	1,3
Eau avec traces d'acide carbonique	23,2
	99,2

En faisant abstraction de l'alumine, qui paraît y former un mélange accidentel, on est conduit à la formule très simple :



$$CaO.SiO^2 + 2HO.$$

Par ses proportions, cette substance paraît différer du silicate de chaux hydraté nommé okénite, qui a été rencontré dans les roches amygdaloïdes des îles Feroë, de l'Islande et du Groenland. Si elle constitue une espèce nouvelle, on en pourrait rappeler l'origine par le nom de *plombiérite*. C'est comme de la wollastonite hydratée.

Pour contrôler l'analyse que j'avais faite autrefois, j'indiquerai celle que M. Fouqué a bien voulu faire d'un autre échantillon.

Acide carbonique	11,26
Silice	41,89
Chaux	33,30
Magnésie	0,21
Alumine	1,18
Sesquioxyde de fer	traces.
Soude et potasse	0,10
Eau dégagée au-dessous de 120 degrés	5,83
Eau dégagée de 120 degrés au rouge vif	6,69
	100,66

Cette substance, traitée par l'eau distillée bouillante, fournit une solution alcaline; mais le titre de cette solution est si faible que le liquide résultant du lessivage de 2 grammes de matière est neutralisé par une liqueur renfermant moins d'un milligramme d'acide sulfurique monohydraté.

De la silice hydratée et de l'opale sont mélangées en proportions variables à ce dépôt gélatineux. Le mélange est même reconnaissable sur quelques grains, par l'essai de la dureté et la résistance aux acides ; il rend difficile de préciser une composition quantitative.

Quoi qu'il en soit, nous voyons ici un silicate que l'eau transporte et dépose à la manière de la silice elle-même, et ce fait peut expliquer certains traits du métamorphisme de contact.

Parmi les produits des sources thermales actuelles, il faut encore rappeler l'halloysite. J'en ai recueilli une variété dans les filons de quartz et de fluorine, à travers lesquelles jaillissent les sources thermales. Au milieu des masses formées de fluorine, l'œil est attiré par une substance d'un blanc de neige, d'abord molle et translucide, mais qui devient opaque par la dessiccation : elle forme des veines de 2 à 3 centimètres d'épaisseur. Cette substance, dont la formation paraît se continuer aujourd'hui, et qui a reçu le nom de savon minéral, savon de Plombières ou saponite, a été analysée successivement par Berthier et par Nicklès. C'est un silicate d'alumine hydraté, qui est mélangé de gypse : il a une grande ressemblance avec l'espèce halloysite et a été rapportée à la nontronite.

L'opale mamelonnée translucide et incolore, appartenant à la variété appelée hyalite, se rencontre à Plombières, associée aux zéolithes et parfois avec abondance. Comme exemple je citerai une fissure de la maçonnerie, où cette substance se montre en nombreux mamelons (fig. 18).

Dans les pores microscopiques de la roche, j'ai également reconnu, l'opale de la variété hyalite, sous forme de globules très petits ($0^{mm},03$), n'ayant qu'une très faible action sur la lumière polarisée, comme les substances gommeuses (fig. 19, 20 et 21).

Rappelons, comme analogue, l'opale déposée autrefois par les eaux de Saint-Nectaire, dans des fissures qu'elles ont aussi incrustées.

Les briques antiques dans le tissu desquelles il s'est formé des zéolithes à Plombières présentent aussi, parfois (fig. 22),

dans leurs pores, de petits sphérolites fibreux et rayonnés. Ces sphérolites diffèrent de ceux d'opale, dont il vient d'être question, par la forte action qu'ils exercent sur la lumière polarisée ; ils donnent une croix noire fixe lorsqu'on tourne la préparation entre les nicols croisés ; en un mot, ils présentent les caractères optiques de la calcédoine. D'ailleurs ces globules rayent le feldspath et sont inattaquables par les



Fig. 18. — Mamelons d'opale hyalite *o*, déposés par les sources thermales, dans une fissure de la maçonnerie de Plombières. Echelle de $\frac{1}{2}$.

acides. Quelquefois ils se sont appliqués sur les parois des cavités et forment une série de demi-sphères contiguës entre elles; leur diamètre atteint $0^{mm},02$.

Dans certains enduits blancs, et quelquefois violacés, qui se sont déposés sur des fragments des roches du béton, j'ai reconnu de la fluorine pulvérulente et formée de cristaux microscopiques. Elle est souvent avoisinée par l'apophyllite, qui elle-même renferme du fluor.

Beaucoup de cavités contiennent aussi la chaux carbonatée rhomboédrique, associée à la chabasie, comme dans les roches volcaniques de l'Islande. Elle se présente avec des formes variées; tantôt en scalénoèdre $d\frac{6}{5}$ surmonté du rhomboèdre (fig. 23), tantôt en rhomboèdres.

Des cristaux blancs d'aragonite, en double pyramide à



Fig. 19. — Brique zéolithique coupée en tranche mince et montrant l'opale ordinaire e l'hyalite, déposées dans les pores par les eaux thermales de Plombières; grossissement de 180 diamètres.

six pans et très aiguë, rappellent particulièrement les échantillons des gîtes de fer de Framont et de certains basaltes : c'est la variété de forme nommée apotome par Haüy, avec le biseau e^1. Plus souvent, l'aragonite est en cristaux aciculaires, incolores ou d'un vert tendre, qui forment de petites houppes à l'intérieur des géodes.

Enfin, parmi les cristaux rencontrés dans le béton calcaire, il en est un en lames blanches nacrées, de forme rhombe; ses angles plans, mesurés à la chambre claire, ont

été trouvés de 127 et 62 degrés. Il a deux axes optiques très rapprochés et situés dans un plan normal à celui des lames. Cette substance, qui, par son aspect, rappelle la stilbite, se dissout avec effervescence dans les acides, en y apportant de la chaux et de l'alumine et en laissant un léger résidu de silice gélatineuse; elle est hydratée et infusible. C'est une combinaison qui paraît différer des minéraux

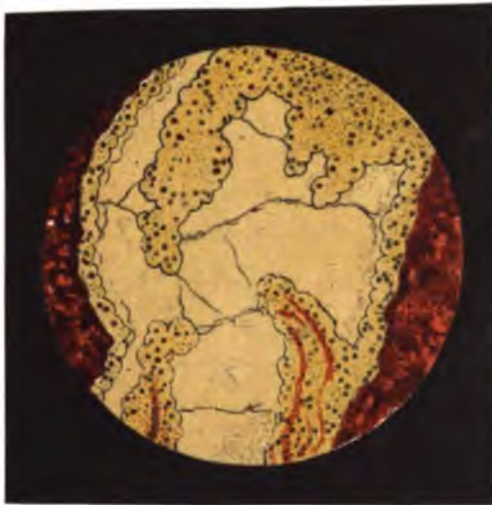


Fig. 20. — Portion de la même brique vue à un grossissement de 600 diamètres.

connus. L'analyse n'en a pas été faite, faute d'une quantité suffisante de substance pure.

Pour compléter l'énumération précédente, il convient de dire ce qu'apprend l'examen de la pâte des briques zéolithiques.

La pâte de ces briques a subi une transformation que j'ai constatée, tant à l'aide du microscope qu'au moyen de l'analyse chimique. Elle s'est incrustée, souvent jusque dans ses moindres pores, de diverses substances, dont la présence, au point de vue de la formation de certaines roches, n'est

pas moins instructive que celle des géodes de plus grande dimension dont il vient d'être question.

En général, le changement survenu dans une brique s'annonce, à la première vue, par la différence qu'elle offre, avec les briques de la même époque qui n'ont pas été soumises à l'eau thermale, et que l'on peut encore retrouver en grand nombre à la surface du sol. Tandis que ces dernières sont ordinairement mal cuites et friables, les morceaux em-

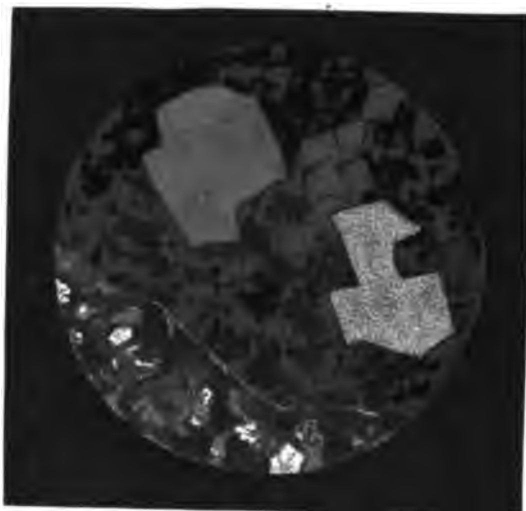


Fig. 21. — Brique zéolithique réduite en tranche mince, montrant l'opale et une zéolithe de forme rhomboédrique (chabasie?) déposée dans les cavités par l'eau thermale de Plombières. Grossissement de 600 diamètres.

pâtés dans le béton sont souvent durs, fort compacts et d'une sonorité qui rappelle celle des phonolithes; le marteau en détache des aiguilles minces et tranchantes.

D'après l'examen microscopique, les briques ainsi transformées se sont intimement imprégnées de minéraux variés.

D'abord une brique ordinaire, également de l'époque romaine, mais qui n'a pas été modifiée par l'action de l'eau minérale, a été soumise au microscope après avoir été ré-

duite en tranches minces : c'était le terme de comparaison nécessaire pour faire la part des transformations qui nous occupent. Cette brique se compose d'une matière amorphe, transparente et incolore ou légèrement teintée en jaune, criblée de vacuoles où sont disséminées d'innombrables granules de silicate ferrugineux coloré en rouge vif par le peroxyde de fer : on y distingue aussi de très abondants grains de quartz, la plupart brisés et à contours irréguliers,



Fig. 22. — Brique zéolithique réduite en tranches minces et montrant la calcédoine et l'hyalite déposées dans l'une des cavités, qui en est remplie, par l'eau thermale de Plombières. Grossissement de 130 diamètres [1].

quelquefois aussi des fragments de grès quartzeux. Un cristal isolé de feldspath triclinique y a été aperçu. Il s'y trouve de très nombreuses lamelles minces, incolores, s'éteignant sous les nicols croisés dans la direction de leur longueur et devant être considérés comme des paillettes de mica vues par leur tranche. Le quartz est très riche en cavités dans aucune d'entre elles, nous n'avons constaté la présence de gouttelettes de liquide, ce qui peut résulter de la haute

température à laquelle les briques ont été portées pendant la cuisson. Une disposition fluidale y est presque constante; elle est reconnaissable à l'alignement des granules rouges, des grains de quartz et des paillettes de mica, qui s'allongent dans la même direction (fig. 24).

Dans les briques qui ont subi l'influence de l'eau minérale, les vacuoles, au lieu d'être restées vides, comme dans les briques naturelles, sont remplies de matières transpa-

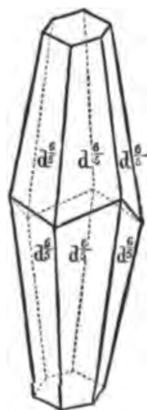


Fig. 23. — Scalénoèdre de calcite déposé par l'eau thermale dans la maçonnerie romaine de Plombières. Echelle d'environ 50 fois.

rentes et incolores et qui y sont inégalement réparties. Ces dernières substances doivent par conséquent être attribuées avec certitude à l'action lente et prolongée de l'eau thermale à laquelle ces briques ont été soumises.

Parmi les substances que j'ai observées dans les pores des briques, outre les zéolithes, l'opale et la calcédoine déjà mentionnées, je signalerai les suivantes :

1° A côté des sphérolithes fibreux bien caractérisés, qui offrent les caractères de la calcédoine, il est des globules plus petits ($0^{mm},03$); ils sont souvent disséminés dans une substance incolore, transparente et inactive, qui est l'opale;

ces globules ont une faible action sur la lumière polarisée, comme les substances gommeuses. Souvent alignés le long des parois de la cavité, comme une sorte de broderie (voir plus haut les figures 19 et 20), ils présentent tout à fait les caractères de ceux que l'on rencontre très fréquemment dans les rhyolithes, par exemple dans ceux de la Hongrie (Telkybanya) ou de Nisiros.

Sur un échantillon on a reconnu des globules ressemblant



Fig. 24. — Brique romaine de Plombières, réduite en tranche mince, ne présentant aucun minéral déposé par l'eau thermale. La structure fluidale y est caractérisée. Grossissement de 130 diamètres.

à ceux dont il vient d'être question, mais présentant une teinte jaunâtre plus prononcée. Ce qui les caractérise, c'est qu'ils sont attaquables, à la température de 30 degrés seulement, par l'acide nitrique; ils ont les caractères des globules de même aspect, habituels dans les palagonites;

2° Des lames hexagonales à angles arrondis, imbriqués à la manière habituelle de la tridymite et inattaquables aux acides;

3° De la calcite, qui remplit quelquefois entièrement les cavités, avec la forme du rhomboèdre primitif. Un échantillon du basalte du Donnersberg offre exactement la même disposition. La calcite est aussi associée intimement à l'opale, et, dans ce dernier cas, elle affecte souvent la forme du rhomboèdre aigu.

Les diverses substances qui viennent d'être signalées remplissent, partiellement ou en totalité, des cavités microscopiques de formes diverses, tantôt arrondies comme les boursouflures visibles à l'œil nu, tantôt allongées à la manière des gerçures.

Vers les parois de ces cavités, les substances concrétionnées ont généralement pénétré dans la brique, sur une certaine épaisseur, et forment une espèce de pénombre.

La disposition de ces diverses substances, que j'ai examinées avec le concours de M. Fouqué, a été reproduite avec autant d'habileté que d'obligeance par M. Thoulet, dans les figures qui précèdent.

La présence, dans les pores des briques, du quartz calcédoine mérite l'attention. L'opale concrétionnée ou hyalite, dont j'avais antérieurement signalé la présence fréquente dans les géodes des briques, se montre aussi, et abondamment, dans les moindres pores de ces mêmes briques. Mais on voit, en outre, que la silice a pu s'y déposer aussi comme calcédoine, c'est-à-dire à l'état anhydre, quoique la température du milieu ait été, au plus, égale à 70 degrés. La production du quartz, à une température aussi peu élevée, n'avait pas encore été, je crois, signalée.

Voici les résultats que M. Fouqué, qui a bien voulu faire cette analyse, a obtenus sur chacun des deux échantillons de briques zéolithiques.

Brique A. — La matière, d'un rouge uniforme, sauf quelques grains de quartz qui y sont disséminés, perd 4,31 de

son poids, quand on la chauffe au bain de sable, à la température d'environ 120 degrés. Puis, fortement calcinée au rouge vif, elle perd 5,22 pour 100 du poids primitif. Elle ne donne qu'une trace d'effervescence par l'action des acides.

Quand on traite par l'eau distillée bouillante 10 grammes de cette pâte de brique pulvérisée, on obtient une solution alcaline, qui neutralise 8 milligrammes d'acide sulfurique monohydraté. La solution ne renferme que des traces de carbonate alcalin et pas de chaux. Traitée par un acide et évaporée à sec, elle donne un résidu insoluble dans les acides; c'est un silicate de potasse qui rend cette solution alcaline.

Brique B. — Cette matière, douée des mêmes caractères physiques que la précédente, perd 5,05 pour 100 de son poids quand on la chauffe à une température d'environ 120 degrés; elle perd, en outre, 6 pour 100 après avoir été calcinée au rouge vif. Avec les acides, elle ne donne qu'une trace douteuse d'effervescence.

10 grammes de cette brique, préalablement pulvérisée, soumis à l'action de l'eau distillée bouillante, fournissent une solution alcaline qui neutralise 9 milligrammes d'acide sulfurique monohydraté. Il n'y a dans cette solution ni chaux, ni carbonates alcalins, et comme dans le cas précédent, on a constaté la présence de la silice, qui, par conséquent, y est combinée à l'alcali.

10 grammes de chacune de ces pâtes de briques ont été soumis, pendant un quart d'heure, à l'action de l'acide nitrique bouillant, étendu de 5 fois son volume d'eau. On a ainsi obtenu :

	BRIQUE A.	BRIQUE B.
	gr.	gr.
Partie dissoute	1,397	1,438
Partie non dissoute	8,603	8,512
Total	10,000	10,000

ANALYSE DE LA PARTIE DISSOUTE DANS CHACUNE DES BRIQUES.

	BRIQUE A.	BRIQUE B.
Silice	19,39	8,85
Alumine	17,33	19,73
Sesquioxyde de fer	5,37	5,95
Chaux	51,40	60,34
Magnésie	0,75	0,47
Potasse	5,94	5,07
Soude	0,33	0,13
Total	100,51	100,54

Il résulte de ces analyses que des silicates hydratés, à base de chaux et de potasse, et de la nature des zéolithes, se sont graduellement ajoutés à la pâte de la brique, dont ils pénètrent souvent les moindres pores; leur proportion a été trouvée de 13 à 14 pour 100 du poids total.

Cette pénétration de substances étrangères ne s'est pas faite avec uniformité. Un morceau de brique a souvent été transformé à partir de sa surface, sur une certaine épaisseur, et il s'est encadré de veinules concentriques, à la manière de certains rognons de jaspe. Cette dernière circonstance montre bien clairement que la compacité des fragments résulte d'une modification qu'ils ont subie depuis qu'ils sont enveloppés dans le béton. Des différences chimiques séparent ces parties d'aspect différent.

La partie externe et compacte renferme jusqu'à 8 pour 100 d'eau: aussi décrépite-t-elle très fortement, lorsqu'on la chauffe au rouge; la partie centrale et poreuse renferme beaucoup moins d'eau (2 à 3 pour 100). Ces deux variétés de briques diffèrent également par leur teneur en chaux et en potasse. Les deux bases sont beaucoup plus abondantes dans la brique compacte que dans la brique poreuse.

La forte proportion de potasse que l'analyse a révélée dans les briques à zéolithes doit être remarquée. On sait que les argiles renferment toujours une certaine quantité de cet alcali; mais il en existe généralement davantage dans les briques de Plombières; de plus, elle s'y trouve à un état où elle est facilement attaquable par les acides faibles, ce qui n'arrive pas à l'alcali contenu dans les argiles. Celui-ci paraît avoir été fixé, au moins en partie, dans la brique, par le silicate alumineux qui en constitue la base et qui l'a extrait du silicate potassique, tenu en solution dans l'eau thermale. Peut-être est-ce à une action du même genre qu'il faut attribuer la présence de la potasse dans la terre verte, par exemple, dans celle qui s'est substituée aux cristaux de pyroxène, en Tyrol et ailleurs.

La formation contemporaine des silicates cristallisés de la famille des zéolithes, sous l'action d'eaux thermales, n'est pas un fait accidentel, ainsi qu'on aurait pu le croire d'abord. Après avoir signalé cette production actuelle des zéolithes à Plombières (Vosges), j'ai retrouvé le même fait dans l'intérieur des maçonneries romaines, à Luxeuil (Haute-Saône), à Bourbonne-les-Bains (Haute-Marne) et en Algérie aux environs d'Oran.

A Luxeuil, le phénomène est identique au précédent et confirme les conclusions que j'avais tirées des faits constatés à Plombières. Seulement, il autorise à abaisser encore la limite de la température à laquelle les silicates peuvent se

former et cristalliser; car dans cette localité la température des sources ne dépasse pas 46 degrés.

En dehors des minéraux métalliques qui se sont abondamment produits à Bourbonne, d'autres, de nature très différente, se sont formés dans le béton, et surtout dans les boursouflures visibles ou microscopiques des briques.

Peu de semaines avant qu'il fût enlevé à la science, Deshayes, professeur au Muséum, a bien voulu me remettre quelques débris de construction romaine, recueillis par lui, il y a une quarantaine d'années, lors de son voyage en Algérie, et qu'il avait oubliés depuis lors, parmi d'autres objets. Ces débris consistent en chaux, cimentant des fragments de briques et formant un béton, tout à fait semblable à celui que les Romains ont fréquemment employé dans leurs constructions, par exemple dans les thermes de Plombières.

En examinant ces échantillons, je ne tardai pas à reconnaître qu'un certain nombre de cavités de la chaux et de la brique sont revêtues de petits cristaux, ne faisant pas effervescence et, par conséquent, ne pouvant être du carbonate de chaux. Ces cristaux sont transparents, incolores et d'une limpidité parfaite. Leurs formes cristallines y font reconnaître, malgré cette uniformité d'aspect, des espèces bien distinctes.

Il est de ces cristaux dont la forme est celle d'un prisme droit à quatre faces, terminé par une pyramide tétragonale, avec les quatre faces reposant sur les arêtes du prisme ; ils offrent la plus grande ressemblance avec le minéral connu sous le nom de christianite ou harmotome calcaire : ils s'en rapprochent également par la valeur numérique de leurs angles. Certains cristaux offrent sur leurs faces des stries croisées, qui décèlent la macle habituelle de cette espèce;

quelques-uns manifestent cette macle par des angles rentrants.

D'autres cristaux sont terminés en rhomboèdre, dont les angles sont voisins de ceux du cube, comme dans la chabasie; les rhomboèdres sont groupés deux à deux, ou à faces striées, de même qu'il arrive très fréquemment dans la nature pour cette même espèce. Quelques cristaux de chabasie et de christianite dépassent un millimètre et sont par conséquent reconnaissables à l'œil nu.

Dans les mêmes géodes se rencontre aussi la calcite cristallisée, sous la forme d'un scalénoèdre aigu, dont les angles terminaux, d'après les mesures prises par M. Des Cloizeaux, sont respectivement de 120°,20′ et de 114°,3′, et correspondent par conséquent à la notation $d^{\frac{6}{5}}$. Tantôt ce scalénoèdre est coupé perpendiculairement à son axe par une base, tantôt il est surmonté d'un rhomboèdre obtus. D'autres cristaux jaunâtres, de forme indéterminée, consistent aussi en calcite.

Deshayes a cru se rappeler avoir recueilli ces échantillons, en visitant d'anciens thermes situés non loin d'Oran. D'après les indications de ce savant, je supposais d'abord qu'il s'agissait des Bains-de-la-Reine, situés sur la route de Merz-el-Kébir, et dont la température est de 47 degrés; mais les renseignements pris auprès de personnes connaissant parfaitement le pays, n'ont pas confirmé cette supposition. D'après M. Rocard, les sources de Merz-el-Kébir, qui ne sont aujourd'hui qu'à un très faible niveau au-dessus de la mer, n'auraient émergé que depuis l'époque romaine, par suite du mouvement d'exhaussement lent que présente la côte. Cette partie de la province d'Oran renferme de nombreuses sources thermales que l'on voit jaillir au pied des falaises, par exemple celle de Aïn-el-Turk, où l'on a trouvé des ves-

tiges de travaux romains, et celle des Andalouses. Ce serait probablement de l'une de ces sources que proviendraient les échantillons dont il s'agit. Il est toutefois à regretter qu'on ne soit pas renseigné d'une manière plus précise, au moins quant à présent, et qu'on ne puisse recueillir d'autres échantillons de cette localité remarquable, dont une circonstance fortuite a révélé l'existence.

Dans le béton des thermes des environs d'Oran, la chabasie et la christianite se rencontrent, tantôt dans la chaux, tantôt dans les boursouflures des briques.

La chabasie présente une tendance très marquée à s'associer aux débris de bois qui se trouvent çà et là dans le béton, et qui ont conservé leur tissu, en prenant une teinte blanchâtre. Dès qu'on voit un de ces fragments de bois, on est à peu près sûr de trouver des cristaux de chabasie, soit sur le bois lui-même, soit au milieu de ses fibres. Ce fait, que j'ai également constaté dans les maçonneries romaines de Plombières, a son analogue dans les anciennes périodes et rappelle, par exemple, la mésotype qui a parfois imprégné du bois fossile en Auvergne.

Dans les quatre gisements dont il vient d'être question, les zéolithes se présentent avec des caractères entièrement semblables, le même aspect et la même disposition. La généralité de cette formation contemporaine en fait de plus en plus ressortir l'intérêt et montre le parti que l'on peut en tirer pour éclairer plusieurs faits de l'histoire des roches éruptives, particulièrement des roches volcaniques altérées.

Mode de formation des zéolithes contemporaines dans le bassin des sources thermales.

La maçonnerie romaine, quoique actuellement très compacte, a donné accès à l'eau thermale, tant par ses pores que par les innombrables cavités de toutes dimensions qu'elle renferme. L'eau qui l'imbibait constamment était forcée par la pression d'y circuler; le massif de maçonnerie était ainsi, non seulement baigné, mais encore traversé par l'eau minérale. Il y avait un *courant*, très lent, il est vrai, mais continu. Un renouvellement incessant permet à l'eau, qui ne renferme que des traces de matières salines, d'en accumuler, sur certains points, en quantité notable. Des actions très faibles se multiplient ainsi, avec l'aide du temps. C'est une circonstance qui manque dans la plupart des expériences tentées pour imiter la nature, mais dont l'importance, comme application à divers phénomènes géologiques, sera facilement comprise.

A la faveur de l'alcali que cette eau renferme, elle réagit graduellement sur certaines des substances qu'elle traverse, et peut-être même, sans qu'il y ait toujours véritable dissolution, mais par une sorte de cémentation ; elle y engendre alors des silicates doubles hydratés qui appartiennent au groupe des zéolithes. La réunion de ces deux circonstances : circulation de l'eau et réaction chimique, est la condition de ces formations modernes.

Pour que les silicates se constituent et cristallisent, il n'est pas besoin, à beaucoup près, d'une chaleur aussi élevée qu'on l'a supposé; une température voisine de 50 degrés suffit, au moins pour certains d'entre eux. Les zéolithes ont par conséquent pu souvent se produire dans les roches,

sous la simple pression atmosphérique et jusqu'à la surface du sol. Il est remarquable de voir ces silicates cristalliser très nettement, par voie aqueuse, à une température où ils sont réputés insolubles dans l'eau.

Toutes les roches ne se prêtent pas également au développement des zéolithes. Ainsi du granite tout à fait friable s'est trouvé soumis, dans la maçonnerie, aux mêmes conditions que la brique, sans qu'il se soit comporté comme cette dernière substance. De même, dans la nature, on n'a pas signalé de zéolithes formées aux dépens de la pâte même des granites, ni de celle des porphyres à base de feldspath orthose : cependant ces porphyres sont souvent boursouflés et renferment des concrétions siliceuses, comme il s'en est quelquefois formé dans d'autres roches avec les zéolithes.

Mes expériences montrent des contrastes du même genre ; ainsi, au milieu de l'eau suréchauffée, j'ai constaté que du pyroxène augite et du feldspath orthose restent tout à fait sans altération, tandis que les silicates de la nature des verres ordinaires, chauffés dans le même tube, en présence de l'eau, se transforment rapidement en silicates hydratés, tels que les zéolithes.

Les deux substances où les zéolithes se sont si facilement développées à Plombières sont la chaux et la brique. Toutes deux sont précisément de la nature de celles qui entrent dans la fabrication des mortiers hydrauliques. Il est très possible que la connaissance des composés, parfaitement définis et cristallisés, que nous voyons s'y former par l'action de l'eau, contribue à mieux faire connaître la nature des matériaux hydrauliques, et notamment, les réactions qui se font, par voie humide, entre la chaux et la pouzzolane.

Déductions concernant les incrustations zéolithiques et siliceuses des roches amygdaloïdes et de la plupart des roches volcaniques altérées. — Lumière jetée sur l'histoire de ces roches par l'étude des maçonneries zéolithiques.

La généralité de la formation contemporaine des zéolithes par les eaux thermales montre le parti que l'on peut tirer de cette étude, dans le but d'éclaircir plusieurs faits de l'histoire des roches amygdaloïdes et de la plupart des roches volcaniques altérées.

L'ensemble des minéraux disséminés dans les innombrables cellules de la maçonnerie, les zéolithes, l'opale, l'aragonite, constituent une association qui forme fréquemment l'apanage de certaines roches éruptives.

Il y a plus : toute la manière d'être de ces minéraux contemporains rappelle, dans les moindres circonstances, leur disposition dans les nappes de basalte et de trapp douées de la structure amygdaloïde. Si ce n'était la différence de couleur, il serait même très possible de confondre les parties de béton chargées de zéolithes avec des tufs basaltiques où se sont formés les mêmes minéraux ; les briques, avec leurs boursouflures et leurs druses, imitent d'une manière surprenante les roches amygdaloïdes.

Une telle identité dans les résultats décèle incontestablement de grandes analogies d'origine.

Beaucoup de roches éruptives se sont, en effet, boursouflées dans la dernière période de leur refroidissement.

Ces roches, ainsi que les brèches ou tufs dont elles sont accompagnées, ont reçu des infiltrations. L'eau pouvait provenir, soit de vapeurs condensées, soit de sources ordinaires, soit d'une simple infiltration des eaux atmosphériques, soit

enfin de l'action directe de nappes d'eau douce ou marine, sous lesquelles les roches ont dû quelquefois s'épancher. Dans ces trois derniers cas, en pénétrant dans l'intérieur de la roche avant qu'elle fût complètement refroidie, l'eau se trouvait nécessairement échauffée, et, en se mouvant lentement sur certains silicates, elle pouvait réagir, comme dans les maçonneries de Plombières.

Il est d'ailleurs possible que l'eau pure suffise souvent pour produire des zéolithes. Les roches volcaniques en effet renferment déjà des alcalis parmi leurs bases. Échauffée en présence de certains de ces silicates, l'eau peut devenir bientôt minérale, comme M. Bunsen l'a reconnu pour la roche d'Islande nommée palagonite. L'action énergique qu'exerce l'eau sur le verre à des températures élevées, en lui enlevant du silicate alcalin, appuie aussi cette dernière supposition.

Dans leurs incrustations microscopiques, comme dans celles qui sont visibles à l'œil nu, les briques zéolithiques offrent des ressemblances frappantes avec des roches volcaniques très répandues.

Ainsi qu'on l'a vu précédemment, la substance zéolithique imprégnant cette pâte atteint 13 ou 14 pour 100 du poids total, comme dans certaines roches naturelles.

En ce qui concerne les infiltrations siliceuses, elles se rencontrent dans beaucoup de roches volcaniques, d'une teneur intermédiaire en silice, comme on le voit en Auvergne, à Santorin, à Aden, aux îles Saint-Paul et à Amsterdam. Dans les roches volcaniques dites acides, ces infiltrations sont quelquefois très abondantes, au point que ces roches deviennent peu à peu essentiellement quartzeuses, et passent à de véritables meulières. On connaît des exemples de telles silicifications dans les tufs trachytiques de la Hongrie, notamment aux environs de Tokay et de Hlinik, où les roches trachyti-

ques, parfois kaolinisées, sont entremêlées de quartz de diverses variétés, silex, améthyste, etc. (porphyre meulière de Beudant, hydroquartzite de Szabo), ainsi que d'opale (opale noble qui y est exploitée pour la bijouterie, ménilite, klebschiefer). Des faits analogues se montrent dans l'île de Milo, où les meulières, l'opale et la silice gélatineuse sont associées à la cimolite et à l'alunite.

En résumé, ce n'est pas seulement dans les boursouflures des briques, visibles à l'œil nu, qu'il s'est produit, sous l'action de l'eau thermale, des zéolithes et d'autres minéraux, mais aussi dans les parties compactes et dans les moindres interstices perceptibles à la loupe ou au microscope.

Les briques ainsi transformées présentent une grande ressemblance avec certaines roches volcaniques altérées, massives ou à l'état de tuf, quant à la nature des substances engendrées et à leur disposition. Les produits siliceux des briques rappellent les roches acides, tandis que les zéolithes et les globules de palagonite de ces mêmes briques rappellent tout à fait les roches basiques. Ces ressemblances s'étendent jusqu'aux moindres particularités, au point de tromper un minéralogiste exercé, lors même qu'il recourrait à l'emploi du microscope, s'il n'était averti par les caractères ordinaires de la brique.

De pareils traits de similitude et même d'identité autorisent évidemment à faire un rapprochement, quant au mode de formation.

Or, les circonstances dans lesquelles a lieu cette formation contemporaine de zéolithes, accompagnées d'opale, de calcédoine et de carbonates, nous sont parfaitement connues. Nous avons en quelque sorte sous les yeux une expérience des plus instructives, instituée depuis une longue série de siècles. C'est, on peut le dire, une véritable démonstration expérimentale de faits importants, dans l'histoire des

roches éruptives et particulièrement des roches volcaniques altérées, en même temps que dans le régime des anciennes eaux souterraines. Il s'agit ici de types, divers et très répandus, de roches volcaniques, contenant des zéolithes, de l'opale, de la calcédoine et d'autres variétés de quartz, de la terre verte, des carbonates et caractérisés par la présence de l'un ou de l'autre de ces groupes de minéraux.

Quand nous parlons de l'eau thermale, nous n'excluons pas les émanations de vapeur à haute température, telle que l'on en connaît dans les laves actuelles; mais on ne doit pas oublier qu'une eau de 40 à 70 degrés et à peine minéralisée, comme celle de Plombières, a produit des minéraux variés et abondants.

En dehors des roches volcaniques ainsi transformées, dont il vient d'être question, j'ajouterai qu'il en est d'autres, où la transformation paraît s'être faite sous les mêmes influences, mais d'une manière encore plus complète. Telle est la palagonite qui, comme on le sait, est un tuf volcanique très hydraté, dans lequel des concrétions, d'apparence spéciale, remplacent les cristaux de la roche primitive. Il en est probablement ainsi pour la serpentine, qui paraît aussi résulter, dans la plupart des cas, de la transformation de roches à base de péridot. L'hydratation des roches perlitiques, où des concrétions hydratées incrustent des fissures enroulées, provient peut-être d'un phénomène analogue. Ces dernières roches peuvent être considérées comme des états plus ou moins avancés d'un même mode d'altération, sous des influences aqueuses.

Faits actuels imitant l'association des zéolithes aux gîtes métallifères.

Comme on l'a vu, les zéolithes n'appartiennent pas seulement aux roches éruptives ; il s'en rencontre également dans certains gîtes métallifères, tels que les filons d'Andreasberg au Harz, de Kongsberg en Norvège et les amas filoniens du Banat. Une association très remarquable de ce genre se montre dans les gîtes de cuivre du lac Supérieur, où le cuivre gris, par exemple, est souvent disséminé dans la prehnite et quelquefois même remplacé par cette espèce.

Ici les minéraux métalliques se sont souvent enchevêtrés au milieu des zéolithes, de manière à montrer que les uns et les autres se sont produits, à peu près, dans les mêmes circonstances.

L'association intime entre des combinaisons de nature aussi différente, s'explique par ce que nous voyons à Bourbonne, où les zéolithes se sont déposées, dans une même eau, à côté du cuivre gris, du cuivre pyriteux et d'autres combinaisons habituelles aux gîtes métallifères.

Zéolithes dans les terrains stratifiés.

On a vu aussi que les zéolithes ne sont pas nécessairement limitées aux roches éruptives ou aux filons. Depuis longtemps on connaît la mésotype et la stilbite dans les calcaires d'eau douce de l'Auvergne, et l'apophyllite a été signalée par Haidinger dans les calcaires fossifères de l'Écosse. D'après Sismonda, la chabasie s'est développée en rognons cristallins dans le grès tertiaire supérieur des environs de Crevacuore,

dans le voisinage des mélaphyres. Delesse a constaté, par l'analyse, la présence de silicates hydratés de nature zéolithique, dans de nombreuses roches stratifiées, qui ont été modifiées par des masses trappéennes. L'exemple de la maçonnerie de Plombières s'applique également à cette production des zéolithes dans les terrains sédimentaires.

Comme détail démontré par ce qui précède, on peut noter aussi que dans les Féroë, particulièrement à Nelsoë, les zéolithes, d'après Durocher[1], sont particulièrement abondantes vers la ligne de séparation de la roche massive et de son tuf; c'est sans doute un ancien niveau d'eau thermale.

Ainsi que l'a reconnu Sartorius von Waltershausen, après une étude approfondie d'une des localités les plus remarquables par ses zéolithes, les îles Cyclopes, les déductions que nous avons tirées de la formation contemporaine de ces minéraux expliquent l'histoire des zéolithes anciennes, jusque dans les moindres particularités.

[1] *Annales des mines*, t. VI, p. 456, 4e série.

LIVRE II

FORMATION DES GITES MÉTALLIFÈRES ET DES TRAVERTINS

INTRODUCTION

Tout en étant entièrement soudés aux roches encaissantes dans le plus grand nombre des cas, les filons métallifères se distinguent de celles-ci par leur nature minéralogique, qui contraste en général, aussi bien avec celle des roches cristallines qu'avec celle des roches stratifiées.

Les filons métallifères sont des plaques minces par rapport à leurs deux autres dimensions; leur épaisseur dépasse rarement quelques mètres et encore y comprend-on souvent, en dehors du minerai et de ses gangues, des parties pierreuses empruntées aux roches encaissantes, au milieu desquelles les substances métalliques ne forment que des veinules ou ramifications.

Dans le sens horizontal, les filons se prolongent sur de grandes étendues ; les galeries d'exploitation le font parfaitement reconnaître. Quelquefois le fait est discernable à la surface du sol, parce que les parties quartzeuses, ayant mieux résisté aux agents de dénudation, apparaissent sous forme

de crêtes saillantes et discontinues, simulant des murs en ruine. La longueur de bien des filons atteint plusieurs kilomètres et dépasse parfois 10 à 15 kilomètres.

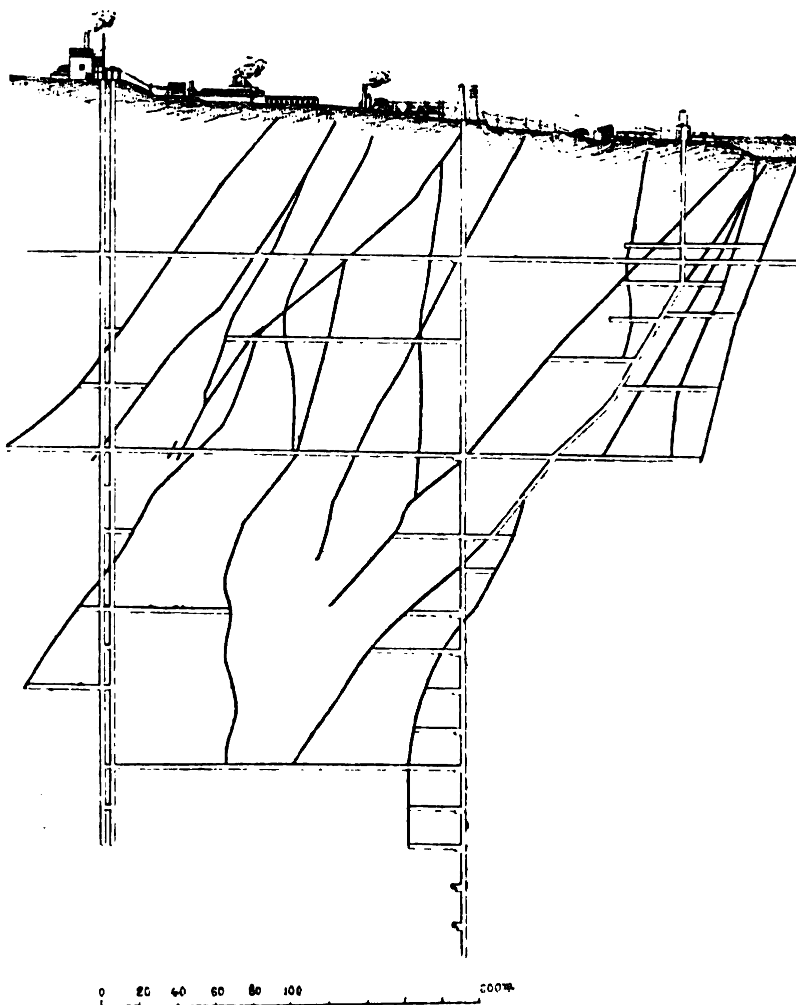


Fig. 25. — Coupe transversale des filons de minerai de cuivre des mines dites Fowey-Consols, dirigée suivant une ligne N.-S. — D'après De la Bèche.

En profondeur, les filons se poursuivent indéfiniment (fig. 26), c'est-à-dire que les travaux d'exploitation n'en

atteignent pas la limite, lors même que ces travaux sont poussés jusqu'à 800 ou 1000 mètres de la surface du sol. Quand on les arrête, ce n'est pas que le filon cesse, mais simplement parce que les conditions du travail deviennent trop difficiles et trop onéreuses.

Quelques définitions relatives aux filons doivent être mentionnées. La *direction* s'indique, comme celle des couches, par la situation relativement aux points cardinaux, de l'horizontale menée dans leur plan. L'*inclinaison* par rapport à l'horizon se compte en degrés, comme la valeur du *plongement* dont on indique en même temps le sens. L'*affleurement* est la portion du filon qui se montre à la surface du sol. Le *toit* est constitué par les roches situées au-dessus du filon, qui n'est tout à fait vertical que dans des cas très exceptionnels, et alors le mot *mur* désigne celles qui sont au-dessous.

Les substances diverses dont les filons se composent offrent parfois, par rapport à leurs deux parois, une disposition symétrique, annonçant qu'elles résultent de dépôts successifs. C'est ce que témoignent aussi les fragments empâtés, lorsqu'ils sont enveloppés d'une série de dépôts variés, à la manière de ce qui se passe quelquefois dans un cristallisoir. Cette disposition, dite en cocarde, est représentée par la fig. 26. Cette structure concrétionnée, non moins que leur nature minéralogique, distingue les filons des roches encaissantes.

Exceptionnellement, sans descendre dans des mines, on peut sur les flancs escarpés de la vallée de la Romanche suivre *à ciel ouvert* les allures verticales d'un filon métallifère. Des recherches ont été pratiquées, il y a une vingtaine d'années, sur le filon de quartz et de galène de Grand Clot

[1] La cote du niveau de la route est d'environ 1300 mètres.

(fig. 27), commune de la Grave, à divers niveaux de son affleurement, qui se montre depuis le fond de la vallée jusqu'à 600 mètres plus haut. Ce gîte se montrait particulièrement riche entre 200 et 400 mètres au-dessus du niveau de la rivière.

Rarement les filons métallifères sont isolés, ils forment ordinairement des groupes ou systèmes dans lesquels ils sont unis par un lien de parallélisme.

La même région présente souvent plusieurs groupes d'orientation différentes. Dans ce cas les filons d'un même alignement se rapprochent ordinairement par leur composition, tandis qu'ils diffèrent de ceux des autres directions. C'est un fait bien connu dans un grand nombre de localités.



Fig. 23. — Filon bréchiforme dans lequel chaque fragment de la roche encaissante est encadrée dans des dépôts successifs.

Pour nous borner à un seul exemple, nous mentionnerons celui dont la ville de Freyberg en Saxe occupe à peu près le centre et qui s'étend sur 19 kilomètres du nord au sud et 7 kilomètres du nord-ouest au sud-est, comprenant une surface métallifère de 125 kilomètres carrés sur laquelle on a reconnu plus de 900 filons. La figure 28 représente ceux qu'une exploitation, remontant à sept siècles, a fait reconnaître dans leurs allures.

Les variations d'épaisseur et de richesse que présentent

souvent les filons et qui apportent tant d'imprévu dans les bénéfices de leur exploitation, sont souvent en rapport avec la nature des roches encaissantes.



Fig. 27. — Vue du filon du Grand Clot, escarpement de la rive droite de la vallée de la Romanche : les traits pleins en représentent les parties qui ont été bien reconnues; un plan incliné désigné par un ponctué servait à descendre le minerai jusqu'à la route.

Les filons métallifères se trouvent seulement dans des régions qui ont subi des dislocations mécaniques profondes. Les pays dont les couches sont restées à peu près horizontales et sans fractures notables en sont dépourvues. La con-

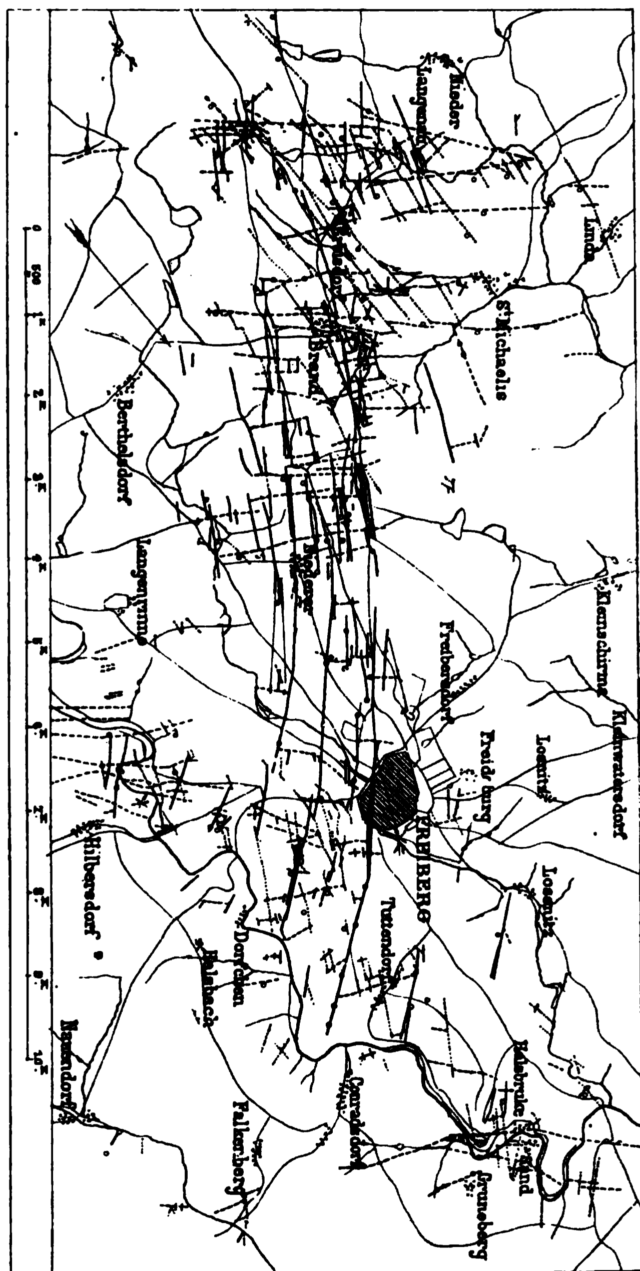


Fig. 28. — Carte générale des filons du district de Freyberg, d'après la carte publiée par l'Administration des mines de la Saxe.

stitution de la France présente un exemple de cette double relation. Tandis qu'ils font défaut dans la partie septentrionale, ils se rencontrent en grand nombre, mais souvent avec une faible richesse, dans le plateau central, dans les Vosges, les Pyrénées, les Alpes et la presqu'île de Bretagne. Souvent ils avoisinent des roches éruptives et dans des conditions où ils s'y rattachent visiblement par un lien de parenté. Bien des pays classiques pour leur richesse métallifère, comme le Cornouailles, la Hongrie et l'État de Nevada, présentent des exemples frappants de cette association.

C'est par l'étude de leurs formes et de la manière indépendante dont ils coupent les roches de toutes sortes que les filons métallifères trahissent leur origine. Ils sont dus à de grandes fractures, failles ou paraclases, qui ont été ultérieurement remplies. Les formes d'ensemble et de détails sont les mêmes de part et d'autre. Dans les uns et dans les autres abondent des fragments anguleux de toutes dimensions, qui ont été détachés des parois lorsque les cassures se sont ouvertes. Ce qui confirme dans le rapprochement entre les filons et les failles, ce sont les rejets que les uns comme les autres présentent souvent à leur croisement (fig. 29).

Les failles qui sillonnent en si grand nombre l'écorce terrestre ont donc subi des destinées différentes dans la série des siècles. Les unes sont restées vides ou simplement remplies de débris arrachés à leurs parois. D'autres ont offert une voie de sortie à des roches éruptives, telles que les basaltes et les porphyres. Il en est enfin, et ce sont celles qui nous occupent en ce moment, qui ont servi de canaux aux émanations métallifères.

Au lieu d'être moulés dans de grandes fractures sensiblement planes, telles que les failles, les exhalaisons métallifères ont souvent rempli des interstices, de formes

irrégulières et extrêmement variées. On peut alors les désigner collectivement sous le nom d'*amas intercalés* ou *discordants*, ou *filoniens*.

Tantôt ils sont juxtaposés à des roches éruptives, comme s'ils étaient venus à leur suite, tantôt ils sont enchâssés dans les terrains stratifiés. Parmi les premiers, les amas

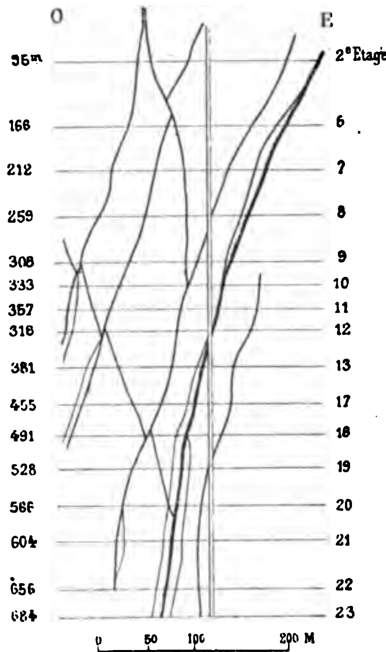


Fig. 29. — Coupe verticale des filons du district Maria Adalberg à Przibram en Bohême montrant leurs rejets relatifs. — D'après MM. Michel Lévy et Choulette.

de cuivre et de fer du Banat et ceux de cuivre de Turjinsk, dans l'Oural, peuvent servir de types. Quant aux seconds, ils sont représentés, par exemple, par les nombreux amas de minerai de fer, dits gîtes sidérolithiques. On connaît, dans diverses parties de la France, le minerai de fer en grains arrondis ou pisolithes, qui remplit avec des argiles des poches à parois corrodées, le plus ordinairement creusés

dans des calcaires. Les amas de minerai de zinc ou calamine, des environs d'Aix-la-Chapelle et de la Silésie, sont dans le même cas.

Les *couches métallifères* ont été déposées, comme les couches pierreuses, dans l'ordre même qu'indique la stratification.

Le minerai de fer présente fréquemment cette forme, dans les terrains stratifiés de tous les âges. Le minerai dit oolithique, dont le nord-est de la France est abondamment pourvu et qui lui constitue, ainsi qu'aux régions voisines, une sorte de privilège, atteste, même sur des échantillons isolés, son origine sédimentaire, à cause des fossiles marins qui y abondent. Il se poursuit, avec les mêmes caractères, dans le grand-duché de Luxembourg et en Wurtemberg. A d'autres niveaux de la série des terrains stratifiés, on trouve les couches d'oligiste exploitées dans l'Ardèche (oxfordien), à la Voulte et à Privas, et celles d'un âge plus récent que possède la Champagne (néocomien). C'est également au minerai de fer en couches que l'Angleterre doit sa principale richesse sidérurgique, soit dans les bassins houillers du pays de Galles et du Yorkshire, soit dans le Cleveland, où ils sont jurassiques et appartiennent par conséquent à une époque beaucoup moins ancienne.

Ce n'est pas seulement le fer qui se présente en couches. On exploite depuis des siècles en Allemagne, dans le Mansfeld particulièrement, une couche mince de schiste bitumineux, imprégnée de diverses combinaisons sulfureuses de cuivre, ainsi que de plomb, de cobalt et d'argent. Les nombreux poissons disséminés au milieu du minerai en attestent suffisamment le mode de formation, qui se reproduit avec certaines différences dans bien d'autres contrées. Tels sont le cap Garonne près Toulon, les Alpes-Maritimes, le pays de Perm; la Bolivie avec son minerai connu dans

le commerce sous le nom de Coro-Coro, le Boleo dans la Haute-Californie. Le sulfure de plomb ou galène est incorporé dans certaines couches, comme celles du grès bigarré de Commern (Prusse rhénane), qui en sont enrichies sur une étendue horizontale de 12 à 15 kilomètres, ainsi que celles de Carnoulès dans le Gard, déjà exploitées par les

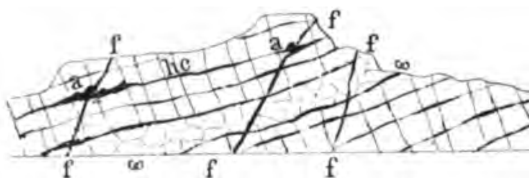


Fig. 30. — Coupe montrant la disposition des dépôts plombeux dans le calcaire carbonifère du Derbyshire. ωω, nappe de toadstone (trapp) injectée parallèlement à la stratification; f f, f f, f f, diverses lithoclases qui ont livré passage aux substances métallifères; *a a*, amas métallifères irréguliers entre les couches calcaires que représentent aussi les traits noirs. — D'après De la Bèche.

Gaulois. A Idria, le mercure à l'état de cinabre est également contenu dans certaines couches fossilifères.

Quoique très distincts dans le plus grand nombre des cas, ces trois types principaux présentent des passages ou transitions de l'un à l'autre (fig. 30). Les liaisons qu'ils présentent quelquefois dans un lieu unique, même entre les deux extrêmes, c'est-à-dire les filons et les couches, établissent des données significatives quant à leur mode de formation.

CHAPITRE PREMIER

ACTION D'EAUX MINÉRALISÉES DANS LA FORMATION DES FILONS

La connexion entre les filons et les fractures profondes du sol, et souvent avec des roches éruptives, témoigne suffisamment que c'est de bas en haut, c'est-à-dire des régions profondes du globe vers la surface, que les substances métalliques et leurs gangues ont été apportées.

Quand ce fait a été reconnu, on a été naturellement porté à croire que l'ascension des minéraux filoniens avait été produite par sublimation ou au moins par fusion. Plusieurs faits montrèrent bientôt qu'il n'en est pas ainsi.

De simples échantillons qui abondent dans les collections minéralogiques apprennent que les substances cristallisées se sont précipitées les unes à la suite des autres et se sont superposées, dans un ordre tout à fait différent de leur degré de fusibilité ou de volatilité. Tel est, par exemple, le cas du quartz précipité sur des cristaux de galène ou de fluorine, à arêtes tout à fait vives (fig. 31).

D'un autre côté, les divers minéraux constitutifs du filon se sont souvent appliqués successivement sur les parois, en couches superposées, de manière à rappeler des dépôts con-

crétionnés, c'est ce qu'exprime la figure 32 et, avec une netteté exceptionnelle, la figure 33.

Une structure concentrique tout aussi expressive peut se rencontrer dans le corps du filon (fig. 34). Tantôt ces dispositions rappellent, quant à l'ensemble et aux détails, celles que présentent les incrustations que les eaux calcari-



Fig. 31. — Fluorine en gros cristaux cubiques, sur lesquels se sont déposés successivement trois autres substances cristallisées : 1° le quartz en prismes bipyramidés; 2° la sidérose en croûtes; 3° la pyrite en cristaux isolés et peu nombreux. La précipitation de chacune de ces trois substances s'est opérée de préférence sur certaines faces, en raison de leur position dans le filon de Hallenhead, Northumberland. — Collection du Muséum. Moitié de grandeur naturelle.

fères produisent chaque jour sous nos yeux, par exemple, dans leurs tuyaux de conduite, ou les dépôts d'aragonite des sources incrustantes; tantôt ces mêmes substances enveloppent, avec l'allure dite en cocardes, une multitude de fragments empâtés dans le corps du filon.

Remarquons en passant que les fragments, avec leurs cocardes minérales, ne sont pas restés suspendus dans le liquide précipitant. Ce fait suppose un élargissement graduel du filon. Ce qui témoigne encore plus clairement en faveur

de cette conclusion, c'est que des substances concrétionnées



Fig. 32. — Portion de filon montrant la disposition rubanée des minéraux constituants, blende, pyrite, manganèse carbonaté (diallogite), quartz, de Bescherglück près Freyberg, Saxe. — Collection du Muséum. Demi-grandeur.

et déposées dans une première phase ont été concassées, puis réempâtées par des dépôts postérieurs, de manière à

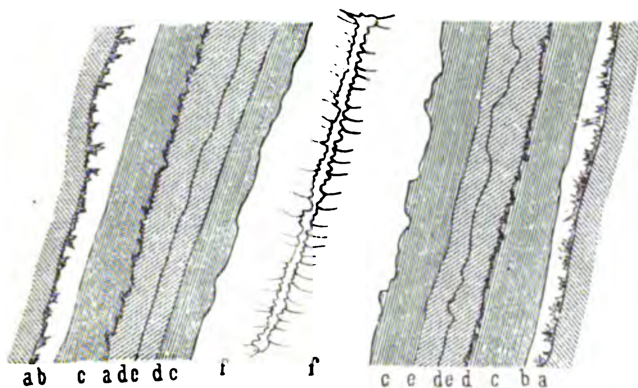


Fig. 33. — Coupe au travers du filon de *Drei Prinzenspak*, près Freyberg, montrant la symétrie observée par ses substances constituantes : *a*, blende; *b*, quartz; *c*, fluorine; *d*, barytine; *t*, pyrite; *f*, calcite. — D'après Weissenbach.

constituer de véritables brèches. Un grand échantillon du Muséum, provenant du filon d'améthyste du Schlüsselstein,

près de Ribeauvillé en Alsace, exprime ces rapports sous une forme éloquente (fig. 35). Il en est de même d'un échantillon. qui figure dans la même galerie, où des veines de quartz et de fluorine serpentent dans le grès carbonifère de Thann (Alsace).

Les couches d'accroissement successifs de certains cristaux



Fig. 34. — Disposition concrétionnée en couches concentriques que présente la blende, la galène et la calcite dans le filon Bescher Glück près Freyberg. — Échantillon du Muséum. Demi-grandeur naturelle.

tels que celui de la fig. 36 témoignent aussi de leur origine aqueuse.

Quand ces dépôts successifs appartiennent à des espèces minérales différentes, ils décèlent l'ordre suivant lequel elles se sont successivement précipitées, ainsi qu'on vient de le voir et comme le montre encore, d'une manière particulièrement caractéristique, la fig. 37.

Dans les filons métallifères, dans ceux mêmes qui sont

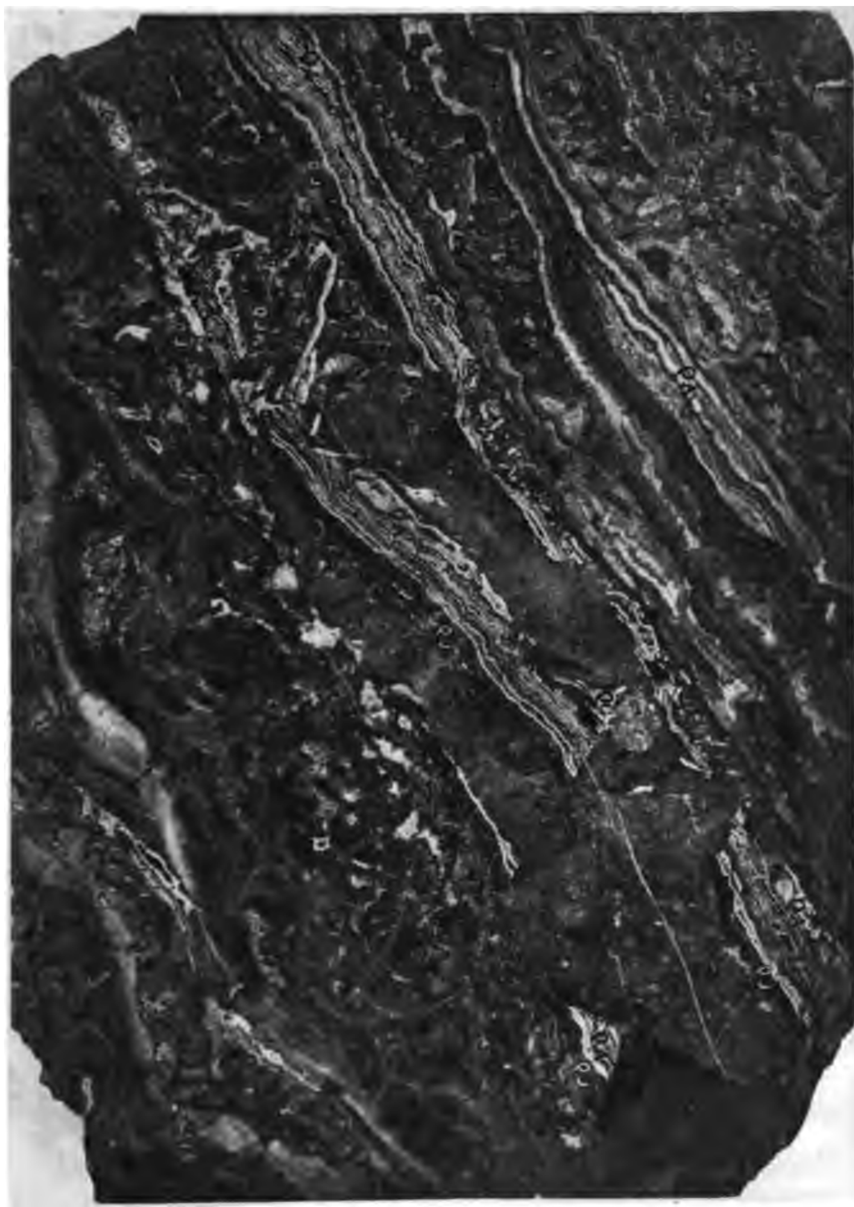


Fig. 35. — Filon de jaspe et d'agate dont la structure, à la fois rubanée et bréchiforme, indique diverses circonstances qui ont accompagné sa formation ; montagne Chaudfour entre Framont et Schirmeck, Vosges — Échantillon du Muséum. $\frac{1}{5}$ de la grandeur naturelle.

exploitables, les matières pierreuses ou gangues prédominent ordinairement beaucoup et, en certaines parties, constituent la presque totalité de leur masse. Ils passent ainsi, par des transitions ménagées, à des filons tout à fait stériles, de quartz, de barytine et de fluorine qui cependant appartiennent bien à la famille des filons métallifères; ils se sont formés dans des conditions semblables. Cette observation



Fig. 36. — Couches d'accroissement successif dans un cristal, en partie à l'état d'améthyste. Échantillon du Muséum. Demi-grandeur.

s'applique particulièrement au quartz, qui constitue à lui seul des filons très volumineux.

La France centrale, la Saxe, la Bohême, la Californie et bien d'autres contrées offrent des filons de quartz, remarquables à la fois par leur nombre et par leurs dimensions. Comme filons barytiques, nous nous bornerons à citer ceux des environs de Brioude (Haute-Loire)[1], et, comme filons de

[1] Dorlhac. *Bulletin de l'industrie minérale*, t. VIII, 1862.

fluorine, ceux des environs de Paulhaguet, dans le même département.

Si l'on passe en revue les principaux minéraux qui se rencontrent dans les filons, on reconnaît que les mêmes espèces, avec des aspects identiques, sont susceptibles de se rencontrer aussi en dehors des filons et dans des circonstances où elles ne peuvent avoir été déposées que par voie humide. C'est le cas pour les substances pierreuses qui servent de gangues, de même que pour les minerais métalliques.

Pour les premières, les terrains stratifiés nous présentent,



Fig. 37. — Pyrite en cristaux dodécaédriques déposés sur des prismes de calcite qui ne présentent aucune altération : elle s'est appliquée à peu près exclusivement sur les bases de ces prismes; de Wheal Wren, Cornouailles. — Collection du Muséum. Demi-grandeur.

en cristaux très nets, le quartz, dans les gerçures de marnolites jurassiques (diamant de Rémusat, fig. 38), dans les silex de la craie blanche, dans certaines couches tertiaires du bassin de Paris (caillasses, meulières, etc.), et dans de nombreuses silicifications de végétaux et d'animaux. La barytine, la célestine, la fluorine, la pyrite, la galène, la blende, et beaucoup d'autres espèces métalliques, présentent des faits semblables.

Il y a plus : il a été possible de surprendre la formation contemporaine de beaucoup de ces espèces dans le bassin

de certaines sources actuelles. A Bourbonne-les-Bains[1], on a mis à sec, en 1874, grâce au jeu de pompes puissantes, le fond d'un puits antique, dit puisard romain, qui a été autrefois établi sur la principale source. En arrivant à huit mètres au-dessous du pavé, on rencontra une boue argileuse noirâtre, renfermant des débris de bois bruni et passé à l'état de lignite, ainsi que des milliers de noisettes et de glands. Dans cette même boue on aperçut, en la soumettant



Fig. 38. — Quartz en cristaux bipyramidés et isolés, d'une limpidité qui leur a valu le nom de *diamant*, dans les gerçures d'une marnolite de la Porte de France, à Grenoble (Isère). — Échantillon du Muséum. Demi-Grandeur.

au lavage, près de 5000 médailles, la plupart de bronze et de laiton. Sous l'action de l'eau thermale il s'était formé, aux dépens de tous les objets en bronze et à leur surface, diverses espèces minérales cristallisées, notamment le cuivre sulfuré ou chalkosine, la chalkopyrite, la philippsite et le cuivre gris ou tétraédrite. Non loin, de la galène s'était produite aux dépens de tuyaux en plomb, et de la pyrite avait

[1] Pour plus de détails, on peut voir : *Géologie expérimentale*, p. 71 à 119.

pris naissance en une multitude de petits cristaux dans un carrelage antique. Toutes ces espèces ont absolument les mêmes caractères que dans les filons métalliques. Comme dans ceux-ci, des combinaisons très différentes se trouvent associées.

Dans l'exemple de la transformation du bronze que nous avons sous les yeux, il semble que la nature, revendiquant ses droits sur ce que l'industrie humaine avait enlevé à son domaine, se soit plu, par l'intermédiaire de l'eau minérale, à reprendre son bien et à reconstituer exactement tous les minerais de cuivre et d'étain que l'exploitation du mineur lui avait ravis, et d'où les fourneaux du métallurgiste avaient laborieusement extrait les deux métaux constitutifs du bronze.

Ainsi se décèle le mécanisme indirect par lequel l'eau, minéralisée par les sels neutres les plus communs, peut réaliser la synthèse des associations minérales naturelles.

Avant qu'on eût observé ainsi, dans toutes leurs particularités, la formation contemporaine des espèces minérales caractéristiques des filons, Sénarmont, par une synthèse directe et dans le laboratoire, avait confirmé les vues que l'observation simple de la nature avait suggérées à Élie de Beaumont[1].

En opérant dans des tubes fermés, sous pression et à une température d'environ 200 degrés, ce savant éminent était parvenu à former, en ne se servant que des substances les plus répandues dans les eaux naturelles, les minéraux suivants : quartz nettement cristallisé ; fer spathique ou sidérose en un sable cristallisé et inaltérable ; magnésie carbonatée ou giobertite ; zinc carbonaté ou smithsonite ; baryte sulfatée ou barytine ; fluorine ; pyrite de fer ; blende ; antimoine sulfuré ou stibine ; pyrite de cuivre ; mispickel ; argent

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXII, 1861.

rouge antimonial; argent rouge arsenical et fer oligiste.

Enfin, en dehors de toutes les considérations qui précèdent, il est encore un fait qui corrobore les rapprochements que nous venons de faire. C'est la similitude que présentent les filons et les sources thermales, quant à leur gisement. Car il n'est pas douteux que les sources qui circulaient dans les filons et les incrustaient à une profondeur de 800 et 1000 mètres, aussi bien qu'aux abords de la surface, ne fussent thermales.

Un examen plus détaillé des filons de quelques districts et de métaux divers a confirmé ces notions. Tels sont les filons de plomb du nord de l'Angleterre, que l'on exploitait naguère dans plus de 300 mines et 21 comtés, particulièrement dans le Durham, le Northumberland, le Yorkshire, le Derbyshire, le Cardiganshire, le Cumberland et le Flintshire. Le calcaire carbonifère que beaucoup d'entre eux traversent ne présente pas, dans leur voisinage immédiat, l'indice d'une chaleur notable qu'il aurait éprouvée; il a été simplement corrodé.

Il en est de même des filons de plomb du Hartz; des filons argentifères de Freyberg en Saxe, de Schemnitz en Hongrie, ainsi que ceux du Mexique et des Montagnes Rocheuses, par exemple du célèbre filon de Comstock. Ceux de Transylvanie où l'or associé à des tellurures s'est précipité sous des formes qui rappellent clairement la voie humide.

En résumé l'étude approfondie des filons démontre qu'ils ont été remplis de bas en haut[1] et par des procédés qui rappellent le plus souvent l'intervention de sources thermales, parfois aussi celle de vapeurs.

[1] M. F. Sandberger a adopté une *lateral-secretous-theorie*, appuyée sur la présence, en petite quantité, de métaux divers dans les roches, que les recherches de Forchhammer avaient déjà signalée, ainsi que sur l'étude approfondie des filons des environs de Wolfach. *Untersuchungen über Erzgangen*. Wiesbaden, 1882 et 1885.

CHAPITRE II

ACTIONS D'EAUX MINÉRALISÉES DANS LA FORMATION DES AMAS FILONIENS

Pour beaucoup d'amas l'action d'eaux minérales se manifeste avec encore plus d'évidence que dans les filons, ainsi que nous allons le montrer par quelques exemples de substances métalliques qu'on y exploite.

§ 1. — FER.

Il y a longtemps que l'examen des gîtes de minerai de fer pisolithique ou pisiforme a conduit les géologues à la conclusion qui vient d'être exprimée. Leurs grains à couches concentriques disséminés dans des argiles, rappellent d'une manière frappante les globules d'aragonite qui se précipitent chaque jour dans le bassin des sources thermales de Carlsbad et qui acquièrent cette forme caractéristique, par suite du tourbillonnement des parcelles dans le milieu précipitant. Toutefois le minerai n'a pas toujours la forme de pisolithes ;

quelquefois il est en rognons, ou en masses volumineuses, comme dans le Périgord.

Les amas sidérolithiques remplissent souvent des cuvettes creusées dans les calcaires et dont les parois sont habituellement corrodées. Dans d'autres cas, ce sont des fentes ou

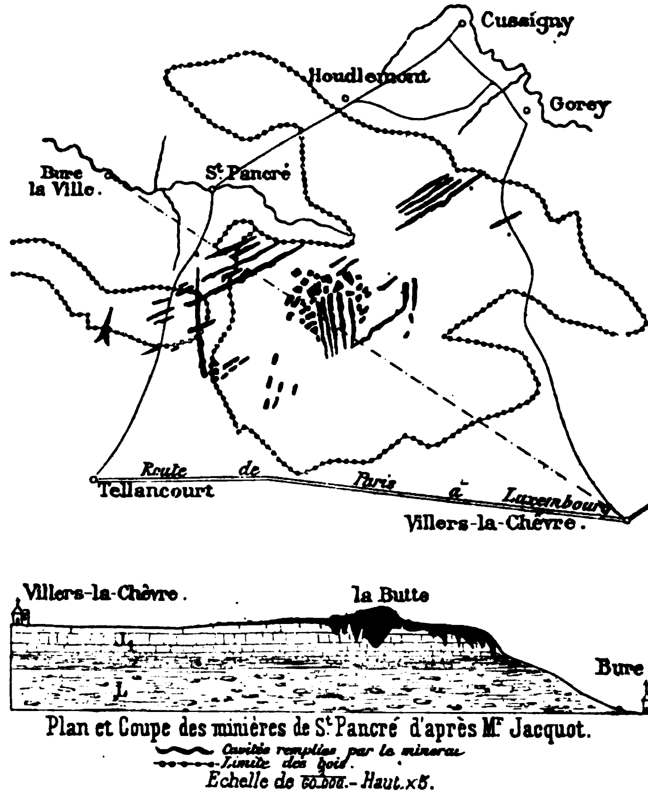


Fig. 39. — D'après M. E. Jacquot.

crevasses plus ou moins rectilignes, quelquefois aussi des formes d'entonnoirs ou puits, chaudières, dont les parois rappellent également l'action d'un dissolvant (fig. 39).

Le liquide dans lequel se faisait la précipitation ne permettait pas en général l'existence d'animaux. Tout paraît

rappeler l'intervention d'eau chargée de carbonate de fer à la faveur d'un excès d'acide carbonique[1].

La forme granulaire du minerai dont il s'agit, son association habituelle à de l'argile, et son mélange sur beaucoup de points avec des éléments du terrain diluvien, lui ont fait attribuer autrefois la même origine qu'à celui-ci et lui avaient valu le nom de *minerai d'alluvion*. Mais la présence avec lui de quartz, soit à l'état de jaspe, soit à l'état cristallisé (Saint-Pancré, Meurthe-et-Moselle), montre qu'il n'en est pas ainsi. Dans certains cas les fossiles provenant des couches calcaires sous-jacentes ont été silicifiées par les eaux qui apportaient le minerai, et celles-ci sont devenues des lumachelles siliceuses. C'est ainsi qu'à Candern, grand-duché de Bade, le jaspe accompagnant le minerai est criblé de foraminifères du terrain jurassique.

Il est aussi des exemples de fossiles entièrement changés en limonite, ce qui s'explique par l'action précipitante du carbonate de chaux sur les dissolutions de peroxyde de fer.

Quand on examine avec soin le minerai de fer pisolithique tertiaire de plusieurs localités de l'Alsace, on y distingue, au milieu de beaucoup de grains amorphes, de nombreux fragments où la structure fibreuse est parfaitement prononcée[2]. Ces fragments fibreux, à angles ordinairement arrondis, ont la teinte brun-jaunâtre du minerai ordinaire. Cette teinte est toujours plus foncée près de leur surface que dans l'intérieur. Leur grosseur dépasse rarement celle d'une petite noisette, de sorte que, vus extérieurement, ils ressemblent beaucoup aux pisolithes voisins.

Leur cassure, considérée à la loupe, présente une série

[1] Dès 1822, Berthier exprimait cette idée (*Annales des mines*, 1re série, t. VIII, p. 356), que Thirria a longuement développée (même recueil, 4e série, t. XIX, p. 49, 1851).

[2] *Comptes rendus de l'Académie*, t. XXI, p. 330, 1845.

de fibres fines et arrondies, sensiblement parallèles, qui se brisent avec de petites esquilles, de sorte à rappeler de la manière la plus frappante la structure du bois; mais les fibres de certaines hématites brunes ou du cuivre carbonaté vert se rapprochent quelquefois assez, au premier abord, du tissu ligneux pour que cette ressemblance ne puisse pas être considérée seule comme une preuve de l'origine végétale.

L'examen microscopique ne laisse pas le moindre doute sur la nature organique des fragments dont il s'agit. En effet, avec l'aide d'une aiguille on en détache des fibres arrondies un peu transparentes qui, vues par réfraction, sont d'un brun marron. La teinte claire du milieu des vaisseaux qui composent ces fibres, comparée à la couleur des bords, fait supposer qu'elles sont creuses. Effectivement, quand on les traite sur le porte-objet par l'acide hydrochlorique concentré, on les voit se démembrer en faisceaux cylindriques, incolores et transparents, évidemment creux, qui sont terminés par des cassures esquilleuses, allongées comme celle de la calcédoine. Le long de ces cylindres on distingue nettement, en plan ou par leur profil, les pores circulaires qui caractérisent les vaisseaux des conifères.

Le résidu du traitement par l'acide hydrochlorique concentré est de l'acide silicique pur. Quant à la partie soluble, elle consiste en oxyde de fer mélangé d'oxyde de manganèse et d'une très petite quantité d'alumine.

Il résulte des observations qui précèdent que les fragments fibreux disséminés dans le minerai pisolithique sont des débris de bois dont le tissu a été complètement remplacé par des substances étrangères sans perdre sa structure. La silice a pénétré tous les vaisseaux, s'est moulée sur leurs parois en forme de tubes extrêmement minces, où les orifices circulaires se sont conservés, tandis que l'oxyde de fer

s'est infiltré moins subtilement, car il encroûte en quelque sorte ces tubes siliceux.

Les fragments de bois ferrugineux sont extrêmement fréquents dans plusieurs des localités de l'Alsace où l'on exploite le minerai de fer; à Mietesheim, par exemple, où l'on trouve quelquefois 15 à 20 morceaux dans une agglomération de pisolithes de moins d'un décimètre cube. On en rencontre encore fréquemment dans les environs de Soulz-sous-Forêts, de Schwabwiller, de Betschdorf et d'Altdorf. On en trouvera aussi sans doute dans d'autres gîtes du même minerai de la France et de l'Allemagne, bien que sa présence n'ait pas été, au moins à ma connaissance, signalée.

L'origine de ces bois ferrugineux se conçoit assez facilement; car à Mietesheim et à Dauendorf, où le dépôt de minerai de fer est associé à des argiles grises contenant des veines minces de lignite et des vestiges charbonneux de plantes, ceux des bois qui ont été plongés dans la dissolution où se précipitaient l'oxyde de fer et la silice se sont assimilé ces substances, comme on l'observe dans les bois ferrugineux conifères du grès bigarré de Soultz-les-Bains. Il est à remarquer que tous ces bois silico-ferrugineux sont constamment en fragments menus et un peu arrondis; ce qui doit faire supposer qu'ils étaient de nature peu cohérente à l'époque où ils ont été agglutinés avec les pisolithes.

Il est des localités où les dépôts de minerai de fer pisiforme sont recouverts par des couches régulièrement stratifiées de diverses roches, poudingue, calcaire d'eau douce avec coquilles palustres, telles que des limnées et des planorbes, silex et gypse. Dans ce cas, les couches superposées appartiennent à la période tertiaire et le plus ordinairement au groupe éocène supérieur.

Ces couches, tout en démontrant que l'arrivée du minerai

n'est pas très récente, comme on l'avait cru, servent à préciser une limite supérieure de l'âge du phénomène, qui paraît correspondre en général à celui du gypse du bassin de Paris.

Comme contrées où les minerais pisolithiques sont particulièrement remarquables, on peut citer, en France, le Berry, où les Romains l'ont exploité, le Périgord, la Franche-Comté, les environs de Longwy, la Lorraine, aux environs d'Aumetz, la Basse Alsace, le Jura bernois aux environs de Delémont; en Wurtemberg, le plateau de l'Alpe, où ils forment un groupe, de Schaffhausen à Nordlingen, d'environ 180 kilomètres de longueur sur 30 de largeur.

On conçoit que les agents qui, pendant la période quaternaire, ont si énergiquement agi à la surface du sol, soit en y pratiquant des érosions, soit en y produisant des dépôts, aient fait de même sur des substances incohérentes comme celles dont il s'agit, quand elles étaient près de la surface. En exploitant certains de ces dépôts, on constate en effet qu'ils ont été remaniés; parfois de grands blocs anguleux de quartzite y sont dispersés (Aumetz); des cailloux de la surface y sont arrivés et des ossements d'éléphants assignent une limite à ce transport. C'est ainsi qu'il a rempli certaines cavernes ou grottes et que dans ce cas se justifie le nom de dépôt d'alluvion.

La relation des minerais de fer tertiaires avec les dislocations du sol est particulièrement mise en évidence, autour du promontoire du grès des Vosges du Liebfrauenberg, qui s'élève au milieu des couches voisines du grès bigarré et du muschelkalk, avec une altitude supérieure à plus de 100 mètres au niveau de celles-ci[1]. Sans importance au point de vue de l'exploitation, les dépôts ferrugineux qu'on y rencontre offrent un intérêt théorique.

[1] *Géologie du Bas-Rhin*, p. 294-299.

Ainsi que le représentent les deux figures 40 et 41, ces dépôts sont groupés autour du chaînon du Liebfrauenberg, comme une ceinture dont la forme se rapproche d'une parabole très allongée, et qui est à peu près continue sur un développement de 18 kilomètres. Ils sont en partie recouverts par le diluvium; aussi n'est-ce que dans un petit nombre d'excavations qu'on peut les étudier.

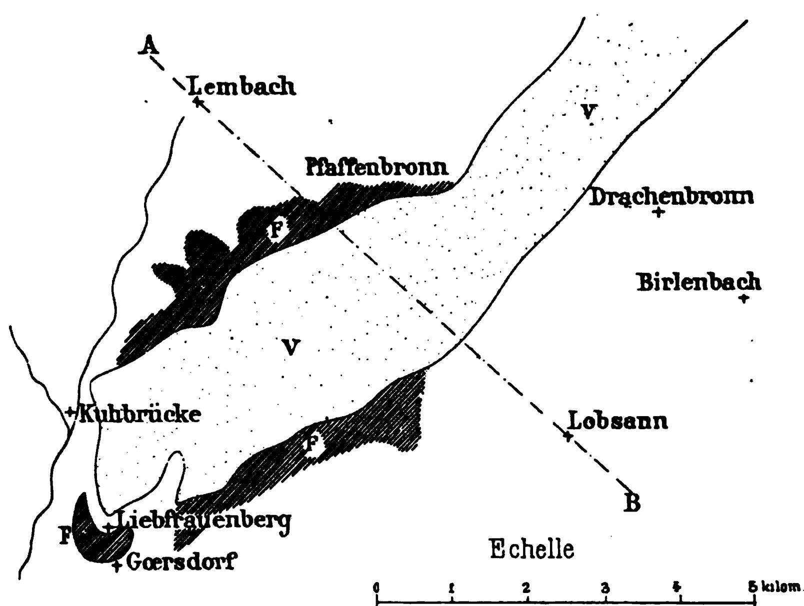


Fig. 40. — Coupe montrant les gîtes de minerais de fer superposés aux failles, qui contournent le promontoire du Liebfrauenberg.

Ces gîtes, de formes irrégulières, sont placés sur une série de failles contournant le promontoire, par suite desquelles les couches triasiques et tertiaires viennent butter contre le grès des Vosges, dans la vallée de Lembach et dans la plaine.

La composition n'est pas uniforme dans toute cette étendue.

A Goersdorf, l'amas, au lieu de consister en limonite, comme à Pfaffenhoffen et à Kühbrücke, consiste en un mélange de pyrite et de fer arsenical.

Près de là, reparaît le minerai de fer qui pénètre dans le calcaire du muschelkalk, auquel il se soude de la manière la plus intime, de telle sorte qu'on peut détacher des échan-

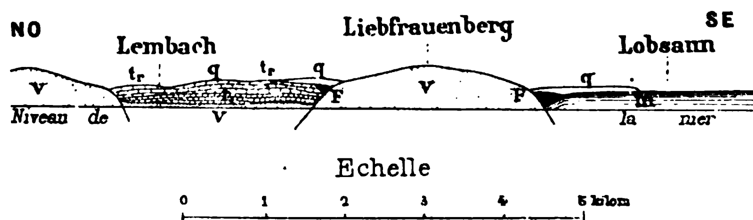


Fig. 41. — Cuppe des gîtes de fer F F juxtaposés au promontoire du Liebfrauenberg, suivant A B de la figure précédente. V, grès des Vosges; t_1, grès bigarré; t_2, muschelkalk; m, terrain tertiaire; q, limon quaternaire.

tillons de petite dimension présentant un passage du calcaire à la limonite. Des blocs de muschelkalk sont empâtés dans l'argile à minerai (fig. 42).

La surface du calcaire sous-jacent est échancrée suivant



Fig. 42. — Coupe d'une partie de l'amas de Goersdorf montrant comment le minerai F s'est déposé sur les tranches des couches du muschelkalk tr qui sont nettement coupées et dont il empâte des fragments anguleux.

des formes sinueuses, dont la vue rappelle immédiatement une corrosion. L'amas paraît résulter d'une précipitation par voie humide, à la surface du calcaire du muschelkalk, roche qui a été à la fois corrodée et imbibée par la dissolution où se faisait le précipité.

Ce qui confirme tout à fait cette supposition, ce sont les

nombreuses empreintes d'*encrinites moniliformis* et de coquilles triasiques qui sont disséminées dans le minerai. Là même où l'oxyde de fer ne renferme plus de traces de chaux carbonatée, la substitution complète du minerai au calcaire s'est faite, sans que les empreintes aient aucunement perdu la netteté de leurs formes.

Dans l'amas qu'on exploitait non loin du précédent, à Lampertsloch, se rencontraient des masses siliceuses avec empreintes de bivalves, constituant un accident fort analogue à l'imbibition siliceuse des arkoses du centre de la France.

Tous ces dépôts postérieurs au muschelkalk et à sa dislocation paraissent se lier à la formation du minerai pisolithique de la plaine d'Alsace, par l'intermédiaire du dépôt de Kutzenhausen.

Parmi les gîtes de fer de l'Algérie, il est un type particulièrement reconnu dans la province d'Oran, consistant en limonite très intimement associée à des calcaires compacts de la période secondaire.

Il en existe à l'est de la Tafna, sur le territoire des Ouelhassa, un groupe remarquable que M. Pouyanne[1] a très bien fait connaître. Le fer s'y rencontre surtout dans des îlots de calcaire liasique, et parfois dans le terrain miocène du voisinage de ces îlots. Les basaltes qui occupent une étendue considérable dans la contrée sont postérieurs au minerai.

Le minerai consiste en hématite plus ou moins manganésifère, qui présente tous les degrés depuis le minerai pur jusqu'au calcaire à peine ferrugineux. Elles contiennent quelques parties de fer spathique altéré et, en quelques points, du fer oxydulé et de l'oligiste. Il n'y a généralement pas d'autre gangue que le calcaire; exceptionnellement on

[1] *Annales des mines*, 7e série, t. IX, p. 81, 1876

y trouve du quartz en géodes ou en cristaux isolés bipyramidés, parfois de la barytine. On ne voit pas de surface de séparation tranchée entre le minerai et les calcaires encaissants. Le minerai dérive de sources ferrugineuses qui ont attaqué le calcaire et l'ont remplacé par du fer formant ainsi une véritable épigénie.

Dans le département d'Oran, les gîtes de fer des Djebel Aouaria, le minerai qui est de l'oligiste se présente tantôt en fentes filoniennes, tantôt en amas résultant de la minéralisation du calcaire.

Les amas de fer oligiste et de limonite du Nassau, de la Westphalie et du Hartz qui sont subordonnés au terrain dévonien démontrent aussi l'intervention de sources minérales, à la suite de la sortie des diabases.

Le long de la Lahn, il existe sur une longueur de 30 à 35 kilomètres de nombreux gîtes de minerai de fer, surtout à l'état d'oligiste, que l'on exploite aux environs de Limbourg, de Dietz, de Weilbourg et de Wetzlar. Il est souvent accompagné de jaspe rouge (Kieselschiefer) et de quartz cristallisé, ainsi que de barytine. Le minerai est en relation évidente, d'une part avec le calcaire, d'autre part avec les diabases ou avec les roches qui en dérivent (Schaalstein). Les fossiles qu'on y trouve, par exemple des *terebratula reticularis*, dont le test est occupé par des géodes de quartz cristallisé, au milieu même du minerai massif[1], sont une preuve que ce minerai a été engendré aux dépens des roches encaissantes. Comme exemple on peut citer l'amas d'oligiste du Kōnigstein, près Giessen, d'une épaisseur de 10 mètres, qui se trouve dans le schaalstein à moins de 100 mètres de la roche éruptive bien caractérisée supportant le château. L'amas de Griedel, près Butzbach, avec son quartz cristallisé, est d'origine

[1] On a recueilli plus de 70 espèces appartenant au calcaire à stringocéphales.

visiblement aqueuse et rappelle tout à fait les gîtes tertiaires de Saint-Pancré, près Longwy.

En Westphalie, aux environs de Brilon, sur une ligne comprise entre Bigge et Bredelar, des gîtes d'oligiste, bien étudiés par M. Von Dechen[1], se présentent sur 22 kilomètres de longueur, en concordance habituelle avec le calcaire et sans relation apparente avec des roches éruptives. Dans l'amas de Sundwig, près Iserlohn, l'oligiste compact est accompagné d'oligiste cristallisé, de quartz et de calcite, semblables à ceux des gîtes en filons. Aux environs de Wildungen, principauté de Waldeck, le minerai de fer manque, mais il est représenté par le jaspe ferrugineux (Eisenkiesel).

Des dispositions analogues à celles du Nassau se retrouvent au Hartz[2]. Aux environs d'Elbingerode le terrain dévonien a également subi des éruptions de diabases, auxquelles se rattache visiblement la formation d'amas de minerai de fer. Au-dessus du calcaire à stringocéphales, des couches calcaires passent graduellement à de véritables minerais de fer, dont la teneur atteint 60 p. 100. Ces passages sont représentés par des roches intermédiaires, nuancées de rouge et de vert et exploitées sur plusieurs points comme marbres décoratifs. Le minerai, qui est tantôt anhydre, tantôt hydraté, est parfois très siliceux, particulièrement près de la roche éruptive. Il paraît dû à des sources minérales, qui ont agi à la suite de l'arrivée des diabases et pendant la formation des couches du calcaire à stringocéphales. En deux autres points du Harz, à Lerbach et à l'Iberg, où le minerai contient de la barytine, des faits analogues se sont produits.

Des relations du genre de celles qui viennent d'être décrites se rencontrent dans bien d'autres lieux.

[1] *Archiv für Mineralogie*, t. XIX, p. 453, 1845.
[2] D'après M. Lossen; voir Termier, *Annales des mines*, 8e série, t. III, p. 243, 1884.

En Belgique, particulièrement dans le pays d'Entre-Sambre-et-Meuse, des amas de limonite situés vers le contact du calcaire et du schiste anthraxifères remplissent des fractures entre les deux roches[1]. Ils affectent la forme de coins, plus ou moins allongés parallèlement aux couches. Il en est qui s'étendent sur plus d'un kilomètre suivant la direction, en présentant toutefois de nombreux étranglements et la disposition dite en chapelet. Leur épaisseur atteint souvent 15 mètres et va jusqu'à 40 et davantage. En profondeur, ils s'amincissent rapidement et disparaissent à des distances de la surface qui varient de dix à une cinquantaine de mètres. Le minerai principal consiste en limonite : au fond de la plupart des gîtes, on trouve, avec des argiles noires et pyriteuses, des amas plus ou moins considérables de sidérose, que l'on connaît en Belgique sous le nom de *theux*. Ce dernier, qui est compact, a la plus grande ressemblance avec du calcaire. Du plomb et du zinc sont associés à ces minerais. Quant aux matières stériles qui les accompagnent, elles consistent généralement en débris des roches encaissantes. Parfois, au milieu du minerai se rencontrent des fossiles transformés en limonite : ils proviennent d'épigénies des parois calcaires qui, ici comme ailleurs, ont été visiblement attaquées, comme par un acide. De là de vastes entonnoirs et cavités irrégulières, ainsi que les contours arrondis, que les gîtes présentent dans le calcaire.

L'oxyde hydraté et le carbonate de fer ont sans doute la même origine et ont été apportés l'un et l'autre par des eaux carbonatées : la différence de nature tient seulement à ce que cette dernière substance se déposait, avec la pyrite, dans des parties où l'eau qui lui servait de véhicule était moins exposée à l'action oxydante de l'air.

[1] Meugy. *Annales des mines*, 5e série, t. VIII, 1855. — Dewalque. *Géologie de la Belgique*, p. 286.

A la minière Hallet, à 1 kilomètre au sud-ouest du village de Pétigny, la limonite remplissant une série de cavités irrégulières coupe un filon pyriteux de quelques centimètres d'épaisseur (fig. 43). La disposition est telle, selon M. Meugy, que les sources paraissent s'être échappées par des fractures nord-sud, devenues aujourd'hui des filons, pour se répandre dans les fissures avec lesquelles elles se trouvaient en communication plus ou moins directe.

Dans le département du Nord, par exemple aux environs

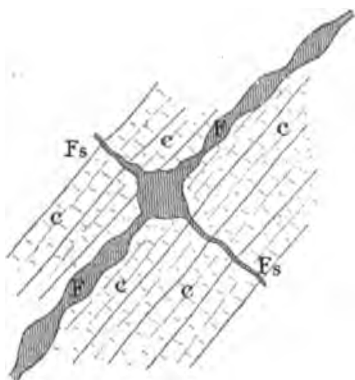


Fig. 43. — Plan de la minière Hallet, près Petigny, en Belgique; montrant un filon de pyrite F, coupant les couches calcaires c entre lesquelles s'est formée une couche F de minerai de fer. — D'après M. Meugy.

d'Avesnes et de Maubeuge, ainsi que dans le Boulonnais, on trouve des faits analogues[1].

Il en est de même dans l'Eifel et dans diverses localités entre Prüm et Büdesheim, sur les bords de la Kill.

Dans les amas d'hématite brune et de sidérose, si nombreux dans les Pyrénées-Orientales et dans l'Ariège, des actions érosives sont visibles aussi dans les calcaires qui les avoisinent.

Les hématites rouges, minerais les plus recherchés de l'An-

[1] Meugy. *Mémoire précité.*

gleterre à cause de leur richesse et de leur pureté, sont particulièrement exploitées auprès d'Ulverstone, en Lancashire, et de Whitehaven en Cumberland. Cette hématite a rempli d'énormes poches dans le calcaire carbonifère, où il se pré-

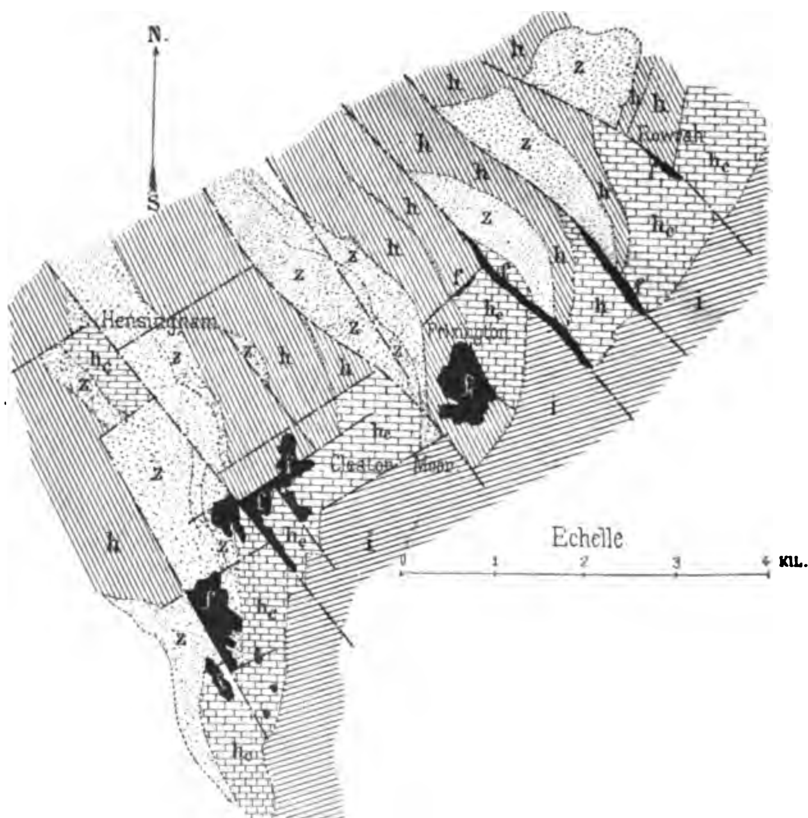


Fig. 44. — Carte géologique de la partie septentrionale du gisement d'hématite du Cumberland, i, schistes siluriens; h_c, calcaire carbonifère; h, millstonegritt et étage houiller; z, permien comprenant le calcaire magnésien et des grès; fff, hématite. Les lignes brisées représentent des failles. — D'après M. Kendall.

sente à tous les niveaux et généralement dans le voisinage des failles (fig. 44 et 45). Elle est souvent siliceuse. M. Kendall[1], d'après l'ensemble des caractères, pense que tous ces

[1] *Transactions of N. England Institute.* Newcastle, p. 23, 1878.

dépôts ont été formés, de même que nos minerais de fer en grains, par des eaux chargées de bicarbonate de fer, qui ont

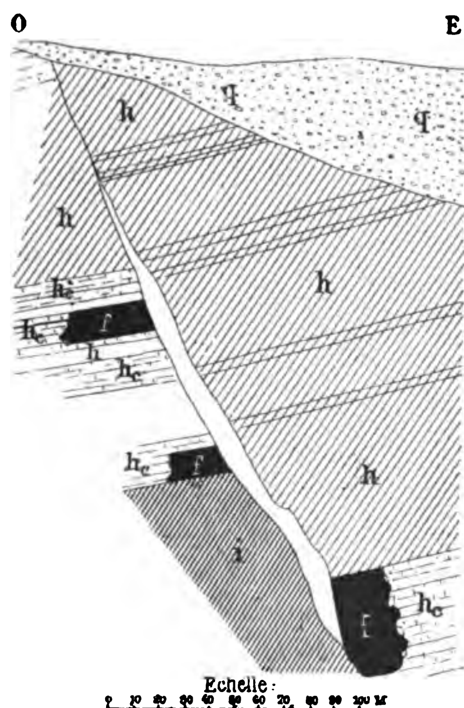


Fig. 45. — Coupe montrant la disposition d'hématite à trois niveaux différents. i, schiste silurien; h_c, calcaire carbonifère; h, millstonegritt et étage houiller; f f f, hématite; q, gravier quaternaire. — D'après M. Kendall.

peu à peu élargi les paraclases et diaclases des calcaires. L'époque de leur formation est postérieure au terrain houiller.

§ 2. — ALUMINIUM ; ARGILE ET BAUXITE.

Il y a plus d'un demi-siècle que l'ingénieur Cauchy, à la suite d'une étude attentive du gisement des argiles exploitées à Andenne, près Namur, assimilait leur origine à celle

des minerais de fer de la contrée, opinion que, de son côté, d'Omalius s'était formée à la même époque[1] et que Dumont[2] adopta en les classant dans ses dépôts geysériens. C'est à cette catégorie qu'appartiennent les argiles qui accompagnent les minerais de fer dans beaucoup de ses amas. En bien des lieux, ces argiles se présentent seules et avec un grand développement. Ainsi l'argile à jaspe et silex du centre de la France, notamment celle de Nontron et de Thiviers, a été déposée sur du calcaire corrodé et dans des puits naturels, circonstances qui rappellent le mode de formation des amas de minerai de fer et de manganèse qui leur sont associés[3].

Dans d'autres localités, l'hydrate d'alumine ou *bauxite* a été apportée, associée à de l'argile et à des rognons de minerai de fer, ainsi qu'on le voit en beaucoup de points de la France méridionale, dans le département des Bouches-du-Rhône, aux Baux, localité qui a donné son nom à la substance, dans le Var, dans l'Hérault et dans l'Ariège[4].

L'amas de cette substance réfractaire exploitée à Villeveyrac et représenté par la figure 46 peut être pris pour exemple de ces épanchements, dont les allures ressemblent extrêmement à celles des amas sidérolithiques. Ils se sont produits généralement le long de lignes de fractures et affectent une disposition linéaire[5]. Tout annonce que ce dépôt a été apporté également par des sources profondes, dont on a rapporté l'âge à l'étage crétacé supérieur.

[1] *Bulletin de la Société géologique*, t. XII, p. 242, 1841.
[2] *Même recueil*, 2e série, t. XI, p. 714, 1854.
[3] Grüner. *Annales des mines*, 4e série, t. XVIII, p. 61, 1850.
[4] Daubrée. *Bulletin de la Société géologique*, 2e série, t. XXVI, p. 915, 1868.
[5] Coquand. id. id. id. t. XXVIII, p. 98, 1871.

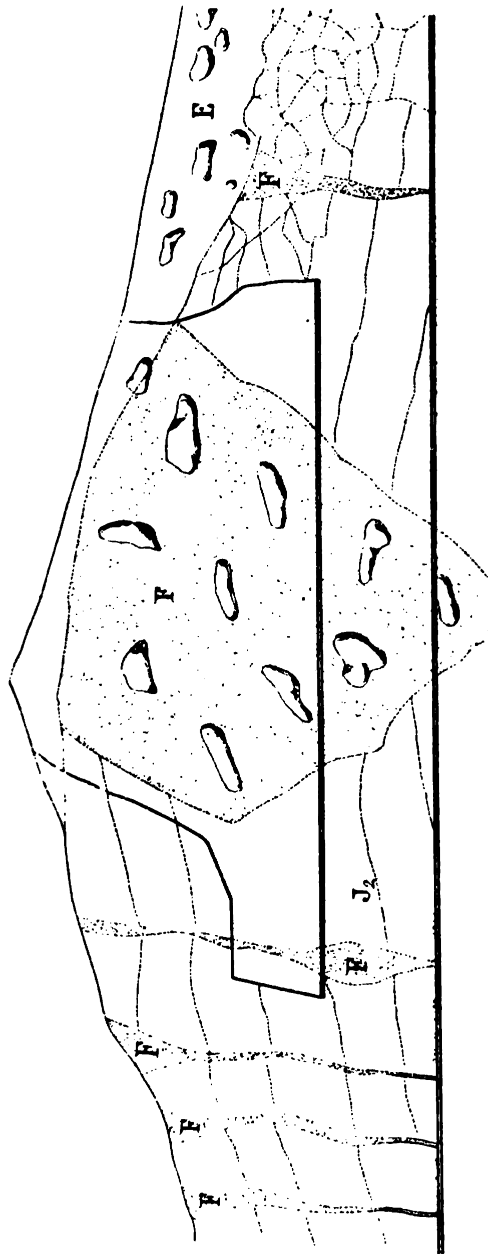


Fig. 46. — Coupe suivant le souterrain de Cantagals, près Villeveyrac (Hérault) montrant les formes des amas de bauxite F F F enchâssés dans le terrain oxfordien J_2; E éboulis. — D'après M. de Rouville.

§ 3. — MANGANÈSE.

Dans ses principaux gisements et particulièrement dans les amas où on l'exploite souvent, le manganèse, non moins que le fer, démontre l'intervention de la voie humide.

Dans une partie du département des Alpes-Maritimes, arrondissement de Grasse, près de Roquefort, des recherches ont fait connaître du minerai de manganèse emplissant une série de crevasses dans des couches calcaires que l'on rapporte aux étages oxfordien et corallien. Ces crevasses, sortes de cavernes remplies, sont irrégulières et tortueuses, le plus souvent verticales; leurs parois présentent, en général, des effets évidents d'érosion. Le minerai de manganèse y est accompagné de quartz cristallisé et plus souvent à l'état de jaspe. Cette disposition présente la plus grande ressemblance avec beaucoup de gîtes de minerai de fer.

Il en est de même des amas de la Dordogne, aux environs de Nontron et de Thiviers, qui sont superposés aux calcaires jurassiques et associés à du jaspe, à de la barytine, à des halloysites et à des fossiles silicifiés.

Les gîtes des Pyrénées centrales, de Vieille-Vallée-d'Aure, de Germ et de Soulon, que Grüner[1] a étudiés, sont visiblement, ainsi que ceux de la Dordogne, d'après ce savant, le produit de sources minérales, principalement chargées de bicarbonate de manganèse.

Cette même action se révèle aussi dans les nombreux et importants amas de manganèse du Nassau, enclavés dans le

[1] *Annales des mines*, 4e série, t. XVIII, p. 51, 1850.

calcaire ou la dolomie du dévonien inférieur, et dans les mêmes conditions que ceux de fer.

De toutes parts se présentent des preuves de la précipitation aqueuse du manganèse à l'intérieur des roches, dans les dendrites que l'on y trouve si fréquemment. Leurs formes mousseuses et arborescentes font quelquefois croire à des empreintes végétales. Elles proviennent de l'eau qui s'est insinuée, par capillarité, dans des fissures en s'y ramifiant. La plupart des couches tertiaires des environs de Paris, les gypses et les marnes qui leur sont associées, les meulières. les grès de Fontainebleau et de Beauchamp, le calcaire grossier, les caillasses et les calcaires de Saint-Ouen, en offrent des exemples remarquables. De même des graviers quaternaires sont parfois cimentés par l'oxyde de manganèse plus ou moins ferrugineux. La voie humide pour tous ces cas est incontestable.

Aujourd'hui encore dans les sources thermales de Luxeuil, qui sortent de failles à une température de 30°, un précipité d'oxyde de manganèse tapisse les parois des baignoires.

§ 4. — NICKEL.

Les abondants gîtes de nickel de la Nouvelle-Calédonie, ainsi que des dépôts connexes de quartz et d'oxyde de fer, montrent clairement l'intervention des eaux souterraines dans leur formation. Dans certaines parties de la serpentine qui constitue des pointements au travers des terrains stratifiés, le silicate hydraté de nickel (garniérite) est venu s'associer à la roche magnésienne.

§ 5. — ZINC ET PLOMB.

Beaucoup d'amas de calamine, où le zinc se trouve à l'état

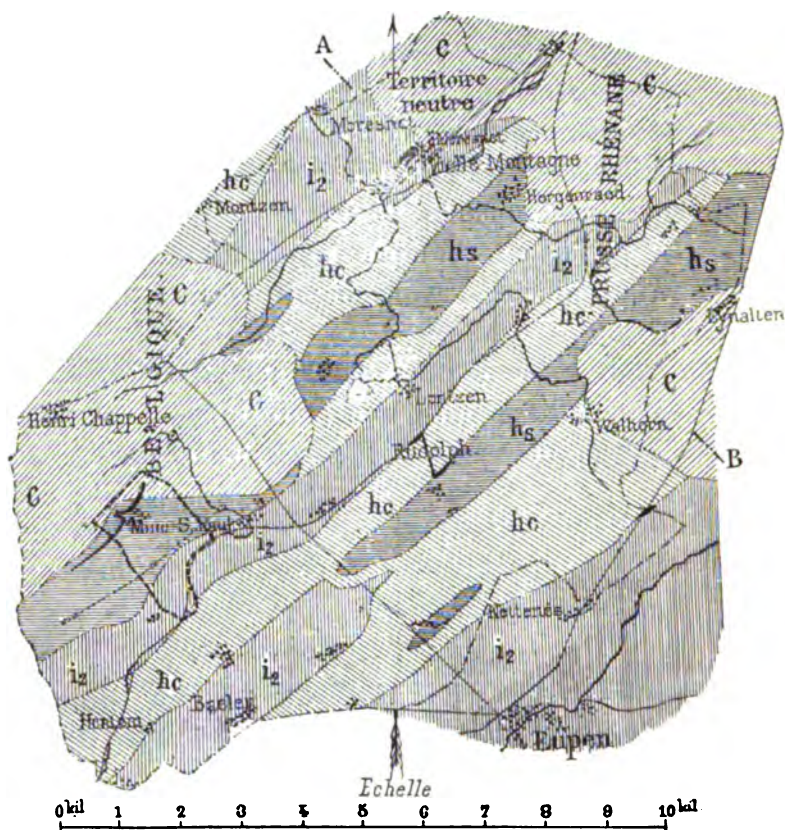


Fig. 47. — Carte géologique de la concession de la Vieille-Montagne, près d'Aix-la-Chapelle, montrant la disposition des principaux gîtes métallifères qu'elle contient, et qu'on a représentés par un fort trait noir. I_2 terrain dévonien; H_c calcaire carbonifère; H_s schiste houiller C terrain crétacé. — D'après Max Braun.

de carbonate et de silicate hydraté, se sont formés dans des

conditions où l'action de sources minérales est particulièrement manifeste[1].

Tels sont ceux des environs de Moresnet, sur la frontière de la Belgique et de la Prusse rhénane, qui sont connues sous le nom de Vieille-Montagne.

Le schiste dévonien supérieur, le calcaire carbonifère et le terrain houiller qui constituent la contrée forment alternativement des selles et des fonds de bateaux, dont la direction s'oriente de N.-E. à S-O. Plusieurs failles dirigées N.-N-.O. à S.-S.-E. coupent le terrain, en y formant des rejets. Elles paraissent être en connexion avec les gîtes métallifères; car

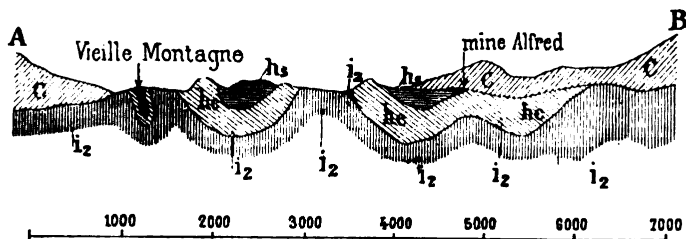


Fig. 48. — Coupe suivant AB de la carte précédente; mêmes lettres que dans cette carte. D'après Max Braun.

ceux-ci se rencontrent de préférence sur les points d'intersection de ces failles avec les limites des terrains, comme l'a reconnu Max Braun[2]. C'est d'ailleurs un fait qui avait été antérieurement signalé pour les gîtes analogues des environs de Stolberg, ainsi que pour ceux de la vallée de la Meuse.

Quelquefois les failles elles-mêmes sont métallifères et le filon voisin du Bleyberg, un des plus importants du pays, en est un exemple. C'est sur sa continuation vers le S.-E. que se trouve le gîte de Moresnet (fig. 47, 48, 49 et 50). La do-

[1] Delanoue. Géogénie des gites calaminaires. *Annales des mines*, 4e série, t. XVIII, p. 455, 1850.

[2] *Zeitschrift der deutsche geologischen Gesellschaft*, t. IX, 1857. — *Bull. soc. géologique*, t. XX, p. 311, 1863. — Dewalque. *Réunion de la Société géologique à Verviers*, 1881.

lomie subordonnée au calcaire carbonifère est remplacée par de la calamine sur plus de 250 mètres de longueur. Le

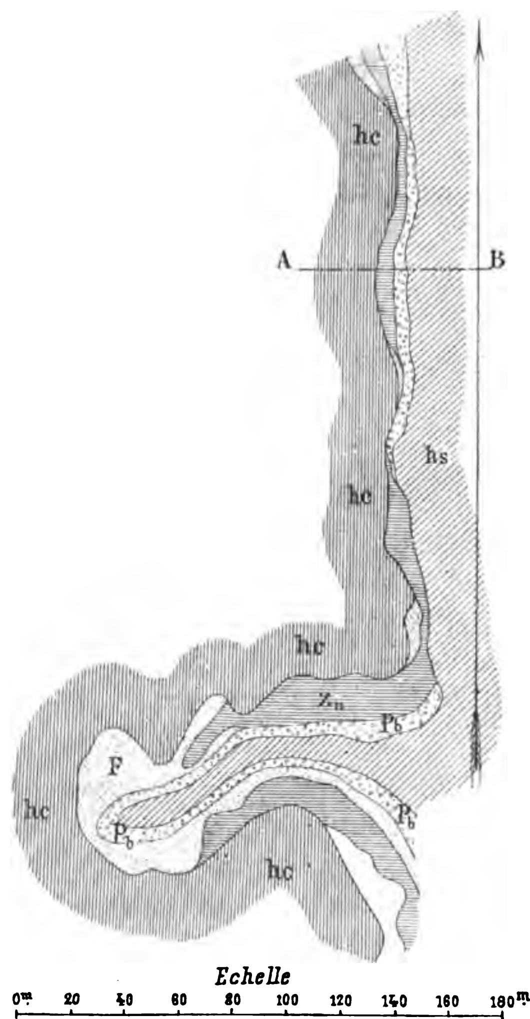


Fig. 49. — Plan de la mine Saint-Paul, près Welkenraedt, à la profondeur de 21 mètres. H_c calcaire carbonifère; H_s schistes houillers; z_n calamine; P_b galène; F F argile avec minerai de fer. — D'après Max Braun.

gîte lui-même est formé par une masse compacte de minerai de 15 à 20 mètres d'épaisseur; dans la partie sud il a été

exploité jusqu'à la profondeur de 95 mètres. Le zinc y est parfois à l'état de silicate anhydre (willémite).

Souvent dans la profondeur, les minerais oxydés sont remplacés par des minerais sulfurés, blende, galène et pyrite, auxquelles s'ajoute la sidérose. La mine de Welkenraedt en présente un exemple bien caractérisé.

Comme l'a admis Max Braun, la formation de ces dépôts s'explique par l'arrivée de sources minérales, tenant du zinc en dissolution, qui ont attaqué le calcaire et l'ont remplacé par précipitation dans les parties où elles affluaient. Ces sources sortaient des failles dont il a été question et circu-

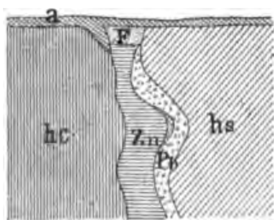


Fig. 50. — Coupe suivant AB du plan de la mine de Saint-Paul, près Welkenraedt. *a*, alluvion; les autres lettres sont comme dans la figure précédente. — D'après Max Braun.

laient le long des contacts des terrains perméables et imperméables.

Sur la rive droite du Rhin, en Westphalie, dans la contrée de Brilon, aux environs de Ramsbeck, au sud d'une grande ligne d'éruption porphyrique de 40 kilomètres de longueur, se trouvent des gîtes de galène et de blende avec pyrite de fer, qui s'étendent sur environ 14 kilomètres[1]. Les empreintes de fossiles que renferment les minerais témoignent également de la substitution des minerais métalliques au calcaire.

Dans l'antiquité, les mines du Laurium, près d'Athènes,

[1] Von Dechen. *Ouvrage précité.*

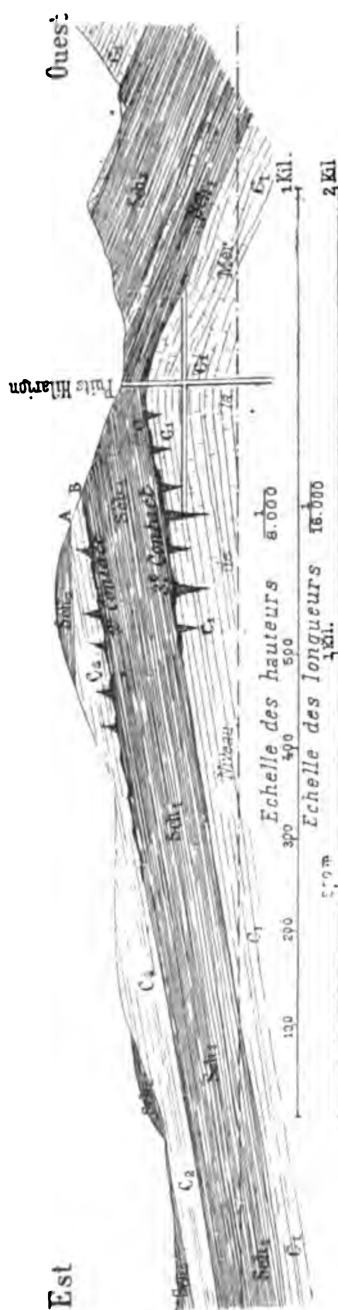


Fig. 51. — Coupe verticale est-ouest par le puits Hilarion, montrant les épanouissements des dépôts métallifères aux contacts inférieur et moyen du calcaire et du schiste. C_1 calcaire inférieur ; Sch_1 schiste inférieur ; C_2 calcaire moyen ; Sch_2 schiste moyen. — D'après M. Alfred Huet.

ont été très activement exploitées pour plomb et argent, et pendant plusieurs siècles, elles étaient une des principales sources de la richesse des Athéniens. Dès l'an 520 avant notre ère, elles sont mentionnées dans leur budget.

Les vastes excavations, anciennes et modernes, dont les gîtes ont été traversés, nous apportent des données particulièrement caractéristiques et précises, que M. Alfred Huet a bien fait connaître [1].

Considéré dans son ensemble, le terrain de la région de Camaresa (fig. 51, 52, 53 et 54) se compose d'une alternance de couches de calcaire marmoréen et de schiste, dont l'âge, faute de fossiles, n'a pu être encore déterminé. En les suivant de haut en bas, on trouve une première assise calcaire, dite

[1] *Mémoire de la Société des ingénieurs civils*, 1878 et 1886. — Potier. *Rapport sur les mines du Sunium*, 1880.

supérieure, en grande partie enlevée par les érosions; puis du schiste sur une épaisseur maxima de 60 mètres; au-dessous, le calcaire, appelé *moyen*, a une épaisseur de 55 mètres et il est immédiatement superposé à un dépôt schisteux qu'on appelle *inférieur* et dont la puissance va jusqu'à 120 mètres. La couche calcaire la plus profonde ou *inférieure* est un marbre blanc, qui est déjà reconnu sur plus de 100 mètres d'épaisseur. Ces couches sont plissées, comme

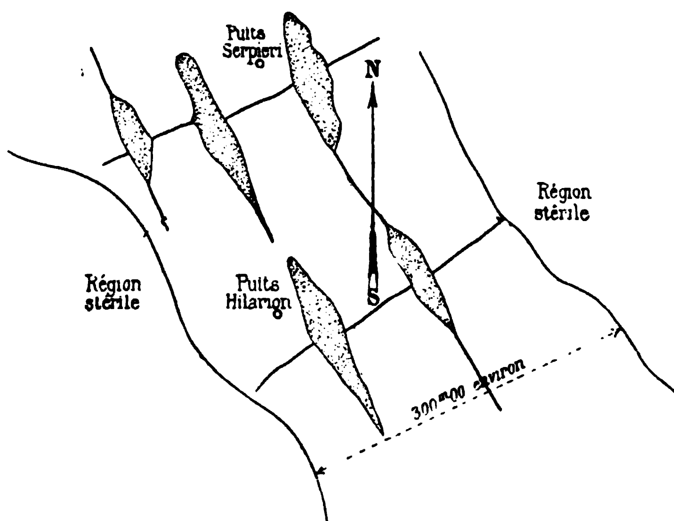


Fig. 52. — Croquis montrant, en plan, la disposition générale des griffons vers le croisement des deux systèmes de diaclases qui traversent le calcaire. — D'après M. A. Potier.

l'indique la figure 51, suivant la direction moyenne N. 15° O. — S. 15° E.; et elles plongent vers l'est et vers l'ouest. En plusieurs points on constate, à part un pointement de granite, la sortie de filons de roches éruptives; ce sont des eurites, souvent à un état très avancé de décomposition.

Les *contacts*, c'est-à-dire les surfaces de jonction entre les schistes et les calcaires, sont particulièrement remarquables au point de vue minier. Si les minerais se trouvent en filets dans les schistes, en amas irréguliers dans les calcaires, ils

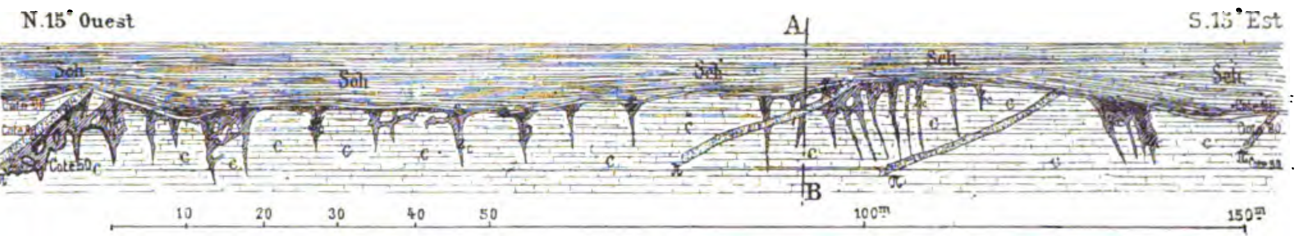


Fig. 53. — Coupe du plateau de Camaresa, dirigée N. 15. O à S. 15. E. parallèlement au plissement et perpendiculairement à la disposition des griffons z et du 3e contact. c calcaire inférieur ; Sch schiste inférieur. On voit que les filons les plus développés sont accolés au mur des filons euritiques π et que leur puissance et leur nombre décroissent à mesure qu'ils s'éloignent de ces filons. — D'après M. Alfred Huet.

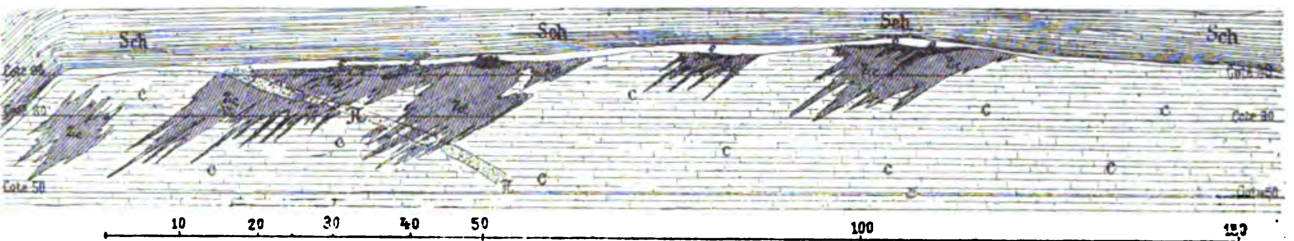


Fig. 54. — Coupe suivant AB de la figure précédente et selon la direction des griffons. Elle montre que les griffons de calamine s'inclinent dans leur plan qui est vertical et comment quelques-uns traversent le filon euritique. — D'après M. Alfred Huet.

s'épanouissent largement dans les contacts, et particulièrement dans le troisième qui est l'inférieur. Les vides immenses, de plusieurs milliers de mètres cubes, laissés par les anciens mineurs attestent qu'ils en avaient déjà compris toute la valeur et qu'ils en ont arraché des trésors. Ce troisième contact est caractérisé par des dépôts considérables de plomb carbonaté avec blende et veines de galène, ainsi que par l'abondance de calamine, laissée par les anciens qui en ignoraient l'emploi.

Le calcaire est traversé par deux systèmes de fentes verticales qui sont minéralisées; les unes dirigées vers le N. 30 E. et les autres dirigées vers N. 20 à 25 O. Les croisements de ces fentes ont fait la richesse de cette région, par leur galène autrefois et aujourd'hui par la calamine.

Les gisements métallifères du Laurium ne sauraient donc être assimilés à des couches, non plus qu'à des filons. Les strates ont été cassées, probablement à l'époque de leur plissement, et dans leurs lithoclases ont circulé les eaux qui apportaient les métaux. Ces fentes se sont naturellement agrandies dans le calcaire qui devait réagir sur les substances dissoutes, en se dissolvant lui-même, tandis qu'elles sont restées très minces dans les schistes. De plus, les eaux minéralisées se sont répandues dans la masse du terrain, soit en suivant les feuillets des schistes, comme à Vromopoussi, soit plutôt entre les schistes et les calcaires, comme le font encore aujourd'hui les eaux douces, à la jonction des couches perméables et des couches imperméables. C'est ainsi que ces anciennes eaux ont déposé sur les contacts, et dans le voisinage des points d'émergence, une sorte de nappe minéralisée.

Les contacts les plus riches sont ceux à toit schisteux et à mur calcaire. Le fait s'explique d'après M. Huet. Le liquide minéralisateur surgissant d'en bas à son maximum de satu-

ration, à haute température et sous forte pression, il a dû agir plus énergiquement sur le calcaire inférieur, ou du troisième contact, auquel les griffons ont enlevé de la chaux en abandonnant du zinc. Il n'a laissé arriver dans le calcaire supérieur que du liquide appauvri. Le schiste par sa résistance forçait le liquide à séjourner plus longtemps, sous le contact, et c'est alors qu'il rongeait le calcaire pour déposer son métal. Après avoir passé à travers le schiste, en échappant à tout tribut de transit, les griffons arrivaient dans le calcaire superposé, qu'ils ont de nouveau traversé rapidement. C'est dans la partie supérieure du calcaire qu'une autre couche de schiste faisant de nouveau barrage, il s'est opéré un épanouissement et un dépôt métallique, comme celui qui s'était produit plus bas, dans des circonstances analogues, mais avec des tensions moindres, à cause de l'appauvrissement des sources.

Comme détail à l'appui de ce qui précède, on trouve (fig. 55) un exemple de la réforme en stalactite du zinc carbonaté du Laurium.

Les contacts ne sont pas toujours métallifères, même dans les régions les plus riches, qui sont situées à proximité de l'axe de soulèvement ; c'est tout au plus si la vingtième partie de la surface totale d'élection est utilement minéralisée.

Les minerais de plomb et de zinc sont généralement associés. La galène et la blende sont le plus souvent intimement mélangées. La calamine ne se trouve jamais qu'au contact du calcaire ou dans le calcaire même, ce qui paraît bien montrer que son dépôt est dû à la décomposition, par le calcaire, d'eaux chargées de sulfate de zinc, comme l'atteste d'ailleurs la réunion fréquente de feuillets calaminaires et de feuillets gypseux.

Les minerais sulfurés peuvent se trouver aussi bien dans

les schistes que dans les calcaires ; mais c'est seulement dans ces derniers qu'ils ont formé de grands amas.

Les filons d'eurite, décomposée ou non, sont avoisinés à leur mur de dépôts métalliques ; cela prouve que cette roche a été, dans les conditions qu'indique clairement la figure 53, comme le schiste, un obstacle au passage des



Fig. 55. — Forme en stalactite de zinc carbonaté au Laurium. Echantillon du Muséum Demi-grandeur naturelle.

liquides. Elle a de même contribué à la formation de griffons calaminaires, avec une grande quantité de fer, ayant un air de couche (couche Hilarion). La puissance et le nombre des griffons diminuent à mesure que l'on s'éloigne des filons éruptifs, qu'ils coupent sous un angle de 45 degrés et qui, dans cette partie, sont connus au nombre de quatre.

Les gîtes de plomb et de zinc de Raibl[1], à part les dépôts de galène et de blende qui sont enclavés dans une couche de dolomie du trias et qui sont en relation manifeste avec des fentes de dislocation, présentent, à un niveau plus profond, des gîtes de calamine, enclavés dans du calcaire; le minerai s'est substitué par précipitation au calcaire, ainsi que l'attestent des fossiles dans lesquels le minerai de zinc s'est moulé. L'enlèvement du minerai laisse des cavités dont les parois, avec leurs sinuosités multiples, annoncent l'action d'un liquide corrosif. Les croûtes de minerai de zinc déposées parallèlement à ces parois témoignent également de ce mode de corrosion et de substitution. Une dislocation a préalablement ouvert dans le calcaire des cassures, à travers lesquelles sont arrivées les dissolutions métalliques.

Les gîtes de Wiesloch, situés sur le revers occidental de la Forêt Noire et déposés dans des cassures du muschelkalk, aux fossiles duquel s'est substituée la calamine, donnent lieu à des conclusions du même genre[2].

En France, les gîtes de calamine reconnus sur le contour du plateau central, à Combecave, Drège, Alloue où Dufrénoy a trouvé un *pecten* transformé en galène, à Croix-des-Pallières, etc., rentrent dans la même catégorie. Des recherches, exécutées depuis quelques années dans le Gard et l'Hérault, décèlent également les effets d'actions chimiques exercées par des sources zincifères sur les dolomies de l'infra-lias et de l'oolithe inférieure, auxquelles correspondent des amas irréguliers. La plupart d'entre eux sont alignés à peu près N. 30. E. et situés au mur d'une grande faille de même direction, qui traverse l'arrondissement d'Alais. Il en est ainsi dans les concessions de Saint-Laurent,

[1] Posepny. *Jahrbuch der K. K. Reichsanstalt*, t. XXV. p. 317, 1873.
[2] *Leonhards Jahrbuch*, p. 907, 1852.

Saint-Julien de la Nef, des Deux-Jumeaux, de la Croix-de-Pallières, des Adams, des Cendras, de Saint-Félix de la Roque et de Rousson.

A Saint-Laurent-le-Minier, se présentent simultanément le puissant amas des Avinières, dans un gros banc de dolomie infra-liasique, ainsi que des cassures de directions très diverses qui traversent le calcaire ancien. La dolomie minéralisée, dont la puissance varie de 6 à 11 mètres, est découpée par un réseau de cassures de deux systèmes différents. Dans l'un d'eux, la minéralisation a été particulièrement active, c'est-à-dire que ce système se distingue par une imprégnation plus étendue des parois. Un enrichissement coïncide au croisement des diaclases.

Dans les Asturies, aux environs de Santander, le silicate de zinc, en amas enclavés dans le calcaire crétacé, se présente parfois avec une structure globulaire, de sorte qu'on le distingue difficilement, à première vue, des dépôts de même structure que produisent aujourd'hui les sources thermales à Carlsbad ou à Hammam Meskoutine.

Nous citerons encore deux importants gisements calaminaires des Montagnes Rocheuses.

Dans la partie orientale de l'État de Nevada, à plus de 2000 mètres au-dessus du niveau de la mer, les mines du district d'Eureka ont acquis tout à coup de la célébrité à cause de leur importante production; depuis 1869 jusqu'à 1883, elles ont en effet fourni à peu près 300 millions de francs en or et en argent, sans compter environ 225000 tonnes de plomb. A raison de cette richesse, les travaux ont été plus complètement développés que dans tous les autres gîtes semblables de la région du Pacifique et ils se prêtent particulièrement à des investigations sur les phénomènes qui ont produit cette classe de dépôts.

La colline dite Ruby Hill est le centre du district minier.

Ainsi que la Prospect Mountain qui l'avoisine, elle est traversée par de nombreuses failles, dont une très importante est dirigée N.-O. à S.-E. Quelques-unes, à la manière de filons, renferment du minerai qui s'est particulièrement accumulé dans des excavations du calcaire concassé et broyé (*crushed*). La connexion de ces poches de minerai avec les fissures se montre de toutes parts. Une éruption de rhyolithe a ouvert la voie aux émanations métallifères; celles-ci partant de la roche volcanique ont pénétré le calcaire, perdant, en même temps que la chaleur et la pression, une partie de leurs éléments.

Les principaux minerais sont la galène argentifère et la pyrite avec les produits de leur oxydation, qui se montrent parfois jusqu'à 300 mètres de profondeur; les minerais de cuivre et de zinc y sont accessoires. La gangue consiste en limonite mélangée de calcite; le quartz est rare, si ce n'est près du contact du calcaire avec le porphyre.

Le bassin du Grand-Lac-Salé, entre la Sierra-Nevada et les Montagnes Rocheuses, renferme d'autres gîtes analogues à celui d'Eureka.

Dans le Colorado les gîtes de Leadville se rapprochent de ceux d'Eureka. Leurs abondants minerais plombifères, après avoir aussi pénétré par des diaclases, ont été visiblement déposés, d'après Emmons, par des solutions aqueuses qui ont concentré leurs dépôts de préférence le long des plans de stratification.

Dans le district métallifère de Leadville[1], le granite et le gneiss sont recouverts d'une série puissante de couches paléozoïques, qui contiennent des masses de porphyre quartzifère, soit interstratifiées, soit superposées. Au point de vue de la richesse métallique, c'est la formation carbonifère qui

[1] Von Rath. *Vortraege*, 1886.

a la principale importance et particulièrement une dolomie d'un bleu grisâtre de 50 à 60 mètres d'épaisseur. Toutes ces couches paléozoïques d'une épaisseur de 1000 à 1500 mètres reposent les unes sur les autres, sans discordance de stratification. Les principaux minerais consistent en plomb carbonaté, sulfuré, sulfaté, avec pyromorphite argent corné et or; la blende et la calamine sont accidentelles; l'arsenic, l'antimoine, du bismuth se rencontrent dans ces minerais et de l'étain a été rencontré dans les fourneaux. Ces minerais sont associés à des oxydes de fer et de manganèse hydratés. Ces minerais se sont substitués au calcaire; ce qui le montre, c'est qu'ils se séparent nettement vers le haut du porphyre, tandis que vers le bas ils forment des amas en poches dans le calcaire. Les accumulations de minerai ne sont d'ailleurs pas limités aux plans de contact du calcaire et du porphyre.

En résumé, malgré des différences locales, les dépôts calaminaires et analogues présentent des analogies frappantes et tout à fait indépendantes de l'âge des couches dans lesquelles ils se sont épanchés : que ces couches soient crétacées, comme en Espagne ; triasiques, comme dans la Haute-Silésie, dans le duché de Bade et la France méridionale; carbonifères, comme en Belgique et en Angleterre; dévoniennes, comme dans quelques autres parties de la Belgique, dans la Prusse rhénane et la Westphalie; siluriennes, comme en Sardaigne. A part les phénomènes précurseurs de dislocations, la présence du calcaire ou de la dolomie, qui ont été corrodés en servant de précipitants, et la situation des gîtes, le plus souvent vers la limite des calcaires et des schistes, c'est-à-dire de roches perméables et de roches imperméables, témoignent clairement de l'intervention des eaux souterraines dans la formation de tous ces gîtes et du régime auquel leurs eaux génératrices étaient soumises.

§ 6. — PHOSPHORE.

Les amas de phosphate de chaux ou phosphorite participent de la nature des amas de minerai de fer, et s'y rattachent souvent de la manière la plus évidente.

Les gîtes du Quercy[1] (Lot et Tarn-et-Garonne) sont enclavés dans les calcaires jurassiques des Causses, où ils ont rempli des crevasses, des poches et des cavités irrégulières. La phosphorite, qui y est associée à des argiles et à des pisolithes de limonite, offre très souvent une structure concrétionnée très caractéristique : ce sont des formes concentriques, rappelant tout à fait le travertin que certaines sources incrustantes déposent dans leur bassin. Sur d'autres points, elle rappelle tout à fait certaines agates. Cette phosphorite contient du chlore et du fluor en petite quantité. Les gîtes se rangent en deux alignements principaux, dont les directions moyennes sont N. 15° E. et O. 18° N., c'est-à-dire à peu près perpendiculaires entre elles.

D'après la manière nette dont les parois calcaires ont été découpées et dont elles se séparent des masses de phosphates, on ne peut douter que ces gîtes ne résultent du remplissage de cavités produites dans le calcaire depuis son entière consolidation. Toutes les particularités de structure qu'ils présentent témoignent d'un dépôt aqueux. Il convient de rappeler qu'à Montricoux, un amas de phosphorite est seulement à 600 mètres de plusieurs gîtes de minerai de fer qui ont été autrefois exploités.

Ces dépôts de phosphorite ne peuvent être attribués qu'à

[1] Daubrée. *Comptes rendus de l'Académie*, t. LXXIII, p. 1030, 1871. — *Bulletin de la Société géologique*, 3e série, t. III, p. 399, 1875.

des sources minérales, où la présence de l'acide carbonique augmentait sans doute le pouvoir dissolvant.

D'un autre côté, on y a trouvé de nombreux débris de vertébrés d'une admirable conservation. L'état complet où se trouvent les squelettes de beaucoup d'entre eux et l'association des restes d'herbivores avec ceux des carnassiers ont conduit M. Filhol, qui en a fait une étude approfondie, à la conclusion que ces animaux ont été surpris par la mort, probablement sous l'influence d'un gaz non respirable, tel que l'acide carbonique. Ces ossements appartiennent à l'époque tertiaire éocène et fixent une limite supérieure de l'âge du dépôt.

Des gîtes phosphatés sont connus à Caylux, Servanac, Montricoux, Concols, Cajarc, Larnagol et d'autres communes, formant un groupe de plus de 40 kilomètres du nord au sud et de 7 kilomètres de l'est à l'ouest, soit d'au moins 300 kilomètres carrés.

Dans le Nassau, et par exemple aux environs de Staffel, les amas de phosphorite sont enclavés dans le calcaire à stringocéphales et la dolomie, appartenant au terrain dévonien de l'étage moyen, exactement dans les mêmes conditions que ceux de fer et de manganèse de la même contrée. C'est même au cours de l'exploitation de ce dernier minerai que la phosphorite a été découverte. Elle affecte souvent la forme de concrétions mamelonnées et de stalactites, qui rappelle nécessairement un dépôt aqueux.

La même disposition se retrouve en Belgique, notamment à Ramelot et à Baelen, arrondissement de Verviers. Placée sur la limite du calcaire carbonifère, la phosphorite est disséminée au milieu des argiles, associées ordinairement à la limonite, dont elle semble avoir pris la place.

Il y a lieu encore de citer, comme analogues aux amas précédents, ceux des environs d'Amberg en Bavière, superposés

au calcaire jurassique inférieur (dogger) et qui paraissent tertiaires[1].

Rien ne montre mieux que les gîtes de l'Estramadure que la chaux phosphatée a été, non-seulement déposée par les eaux, mais qu'elle a été apportée de bas en haut par des sources thermales.

Dans cette partie de l'Espagne, la phosphorite se trouve en de très nombreuses localités, notamment à Logrosan et à Trujillo, localités qui sont distantes l'une de l'autre d'environ 50 kilomètres.

Elle s'y trouve en filons qui sont très nombreux. Ceux de la province de Cacérès ont été l'objet d'une description pleine d'intérêt de MM. Egozcue et Mallada[2]. Ils sont enclavés les uns dans le granite, d'autres dans les schistes cambriens, par exemple celui de Logrosan, où la substance a été découverte dès le siècle dernier, par Bowles, d'autres dans le calcaire dévonien. Ceux du granite, presque verticaux et à peu près parallèles, se dirigent sur une longueur de plusieurs kilomètres, avec des sinuosités, suivant la direction moyenne nord-est à sud-ouest. Leur épaisseur varie beaucoup, tant dans le sens horizontal que dans celui de la profondeur; un même filon passe de quelques centimètres à 3 mètres. La phosphorite est associée de la manière la plus intime à du quartz et quelquefois les deux substances sont disposées par zones parallèles. La structure concrétionnée qu'elles ont souvent, comme dans le Quercy, en démontre bien l'origine aqueuse. L'un des six groupes de cette province, celui de Zarza-la-Mayor et Ceclavin, est représenté en plan et en coupe par les figures 56 et 57. Au contact du filon le granite est ordinairement altéré.

[1] Gümbel. *Sitzungsberichte der k. bay. Akademie*, t. II. p. 335, 1864.
[2] *Provincia de Caceres*, Madrid, 1876.

L'intervention des roches éruptives est à mentionner, comme ayant servi de prélude à l'arrivée de la phosphorite.

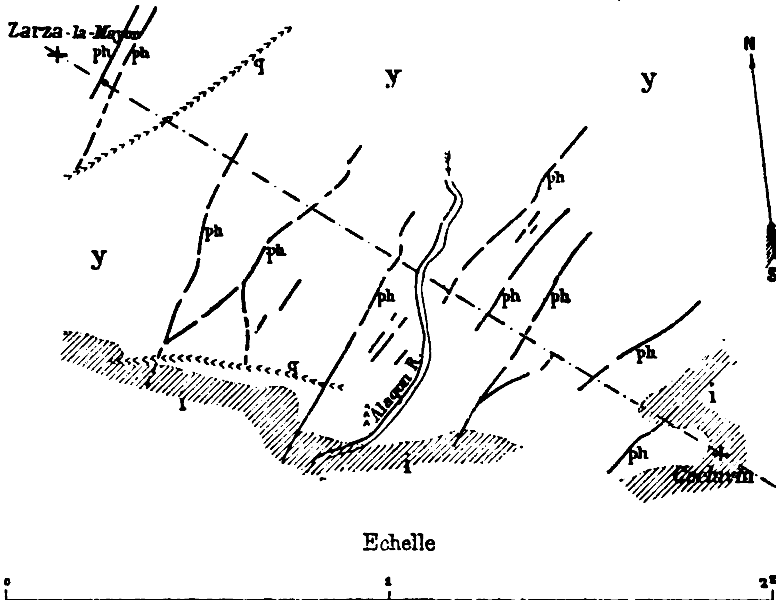


Fig. 56. — Carte géologique de la région comprise entre Zarza la Mayor e_ Ceclavin (province de Cacérès) montrant l'allure des nombreux filons de phosphorite ph et de quartz q qui traversent le granite y et les schistes de transition i. — D'après MM. Egozcue et Lucas Mallada.

A Belmez, du phosphate s'est entièrement substitué à du calcaire carbonifère, en conservant très nettement les em-

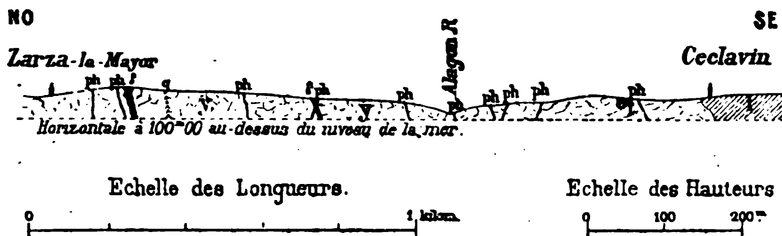


Fig. 57. — Coupe dirigée suivant la ligne AB de la carte précédente, avec les mêmes notations δ, dyke de diorite antérieure à la phosphorite. — D'après MM. Egozcue et Lucas Mallada.

preintes des encrines : nouvelle preuve de la précipitation de ce minéral par voie humide.

Les grands groupes de filons du sud de l'Espagne se poursuivent en Portugal. Dans la province d'Alemtejo, les filons sont encaissés aussi dans le granite, principalement aux environs de Portalègre et de Marvâo. Cette région à phosphate se trouve précisément sur le prolongement de la zone de la province de Cacérès, de sorte que le groupe entier s'étend sur une surface qui n'a pas moins de 120 kilomètres de longueur sur 60 de largeur.

§ 7. — SABLES.

Certains sables se forment sous nos yeux, soit par la désagrégation des roches, soit par leur trituration au milieu d'eaux en mouvement. L'expérience a contribué à faire connaître leur origine[1]. Mais il est aussi des sables qui paraissent apportés des régions souterraines vers la surface, à la manière des argiles, et souvent en même temps qu'elles. Il y a longtemps déjà que d'Omalius et Dumont[2] sont arrivés à cette conclusion, d'après les études qu'ils avaient faites en Belgique, sur des amas de sables parfois très purs, et dont on trouve des analogues dans le terrain sidérolithique de la France, de la Suisse et d'autres contrées.

Les vastes filons remplis de sables à éléments granitiques, quartz de granite, mica, kaolin et exceptionnellement feldspath, sur une foule de points alignés parallèlement à la vallée de la Seine, depuis Mantes et Vernon jusqu'au Plessis-Piquet, doivent être considérés comme une démonstration de ces actions, à la fois éruptives et aqueuses, qui se sont pour-

[1] *Géologie expérimentale*, p. 248.
[2] *Bulletin de l'Académie de Belgique*, t. VIII, 1re partie, 1841, p. 310-322.

suivies au moins jusqu'à l'époque miocène[1]. On doit y rattacher aussi les sables polygéniques et diamantifères qui remplissent les *pans* de l'Afrique Australe[2].

[1] Potier et Douvillé. *Bull. Soc. Géol.*, 3e série, t. VI, p. 609.
[2] Stanislas Meunier. *Comptes rendus*, t. LXXXIV, p. 250, 1877.

CHAPITRE III

ACTIONS DE SOURCES MINÉRALISÉES DANS LA FORMATION DES AMAS STRATIFIÉS ET DES COUCHES MÉTALLIFÈRES

L'intervention de la voie aqueuse dans la formation des couches métallifères est évidente. Quoiqu'elles se soient précipitées dans le bassin des anciennes mers, elles ne représentent pas moins une preuve de l'intervention de sources minérales qui venaient s'épancher dans quelques régions, comme il arrive encore aujourd'hui. C'est ce que démontrent, au moins pour certains cas, les relations des couches métallifères et des amas stratifiés avec les filons et les failles.

Dans l'Ardèche des minerais de fer se présentent en lentilles plus ou moins étendues, dans le trias, le lias, l'étage inférieur du système oolithique et l'oxfordien. Les nombreux fossiles qu'ils renferment indiquent leur synchronisme avec les terrains encaissants. D'après M. Ledoux[1], ces amas sont, presque sans exception, le long de failles importantes : à des distances quelquefois très petites, le minerai s'appauvrit et disparaît.

[1] *Terrains triasique et jurassique de l'Ardèche*, p. 97, 1868.

Cette dernière circonstance confirme bien la supposition qu'ils doivent leur origine à des sources ferrugineuses jaillissant au fond des mers.

La Lorraine renferme dans la chaîne de collines qui encadrent la plaine de Creutzwald, non loin de Saint-Avold, des amas stratifiés de plomb et de cuivre subordonnés au calcaire dolomitique qui termine la formation de grès des Vosges, quelquefois au-dessous, mais le plus souvent au-dessus de cette assise[1]. Ils ne se sont développés que dans les points où la stratification est coupée par des failles; l'âge de celles-ci paraît se rapporter au soulèvement des Vosges. On est donc fondé à penser que ces cassures ont joué un rôle important dans l'arrivée des minerais métalliques, en servant de canaux aux émanations qui les apportaient.

Dans la Prusse rhénane, à Commern, les couches de grès bigarré sont imprégnées de galène en petits nodules, sur une épaisseur de 12 à 20 mètres et sur des étendues horizontales de 12 sur 15 kilomètres. Les conditions paraissent tout à fait semblables à celles que nous venons de mentionner.

Une pareille origine est attribuée au minerai des couches cuprifères du pays de Perm, en Russie, qui s'est parfois moulé dans des troncs d'arbres.

En Lorraine, pendant que la galène se précipitait en globules à Saint-Avold, il se déposait, à Vaudrevange, aussi en globules, du cuivre carbonaté vert ou bleu, dans des couches de grès bigarré. A proximité de ces dépôts se trouve du grès vosgien, sillonné par des cassures qui ont sans doute un rapport avec l'arrivée de ces minerais.

De même le cuivre se rencontre au cap Garonne, près Toulon, et dans les Alpes-Maritimes, où il est encore exploité. Il est subordonné à des couches inférieures au lias, non seule-

[1] Jacquot. *Géologie du département de la Moselle*, p. 356.

ment à l'état de carbonate, mais aussi à ceux de cuivre panaché, de cuivre pyriteux et de cuivre natif.

Les gîtes cuivreux des environs de Turjinsk, dans l'Oural, qui se sont juxtaposés aux roches éruptives, en s'intercalant dans le calcaire, dénotent les mêmes faits pour des sources cuprifères, suivant l'intéressante description qu'en a donnée Gustave Rose.

Les gîtes importants de cuivre que l'on vient de mettre en exploitation au Boléo, dans la Basse-Californie mexicaine, méritent d'être signalés. La constitution géologique du plateau est mise en évidence par de profondes coupures. D'après M. Ed. Fuchs[1], des tufs feldspathiques argileux, constituant quatre couches régulières, se sont étalés dans une mer peu profonde pendant la période miocène et au commencement de la période pliocène. Pendant cette ère de calme relatif ont apparu, à quatre reprises différentes, des roches trachytiques et, par suite, des conglomérats. Des éruptions hydrothermales et surtout cuivreuses sont associées à ces éruptions sous-marines. Le minerai de cuivre, à peu près exclusivement à l'état oxydé, offre quelquefois la texture oolithique. Sur une épaisseur de 55 mètres il constitue trois couches, qu'on suppose s'étendre horizontalement avec des dimensions de 4 sur 14 kilomètres.

Aux couches métallifères se rattachent sans doute celles de phosphorite que l'on rencontre à divers niveaux des terrains stratifiés. Il en est trois bien distincts dans le seul terrain crétacé.

[1] *Bulletin de la Société géologique*, 3e série, t. XIV, p. 81, 1885.

CHAPITRE IV

LUMIÈRE QUE LA LIAISON DES FILONS MÉTALLIFÈRES AUX AMAS ET AUX COUCHES JETTE SUR LE RÉGIME DES EAUX MINÉRALISÉES QUI LEUR ONT DONNÉ NAISSANCE.

Dans de nombreux gisements on voit les amas de diverses sortes, ainsi que les couches métallifères elles-mêmes, se rattacher à des filons.

Dans les Vosges, aux environs de Plombières[1], à côté des filons de fluorine et de quartz desquels jaillissent les sources thermales (fig. 58), les couches inférieures du grès des Vosges sont cimentées par du jaspe rouge et du quartz hyalin souvent cristallisé. La fluorine et la barytine s'y rencontrent aussi à un niveau plus élevé et, jusque sur le plateau, le grès bigarré renferme des veines de quartz cristallisé, qui représente l'épanouissement supérieur du même dépôt et cimente entre eux les menus fragments, dans lesquelles les couches de grès bigarré sont souvent réduites. Ainsi se révèlent, sur un même point, des régimes distincts dans trois roches différentes et à trois niveaux superposés.

[1] *Bulletin de la Société géologique*, 2e série, t. XVI, p. 562, 1850.

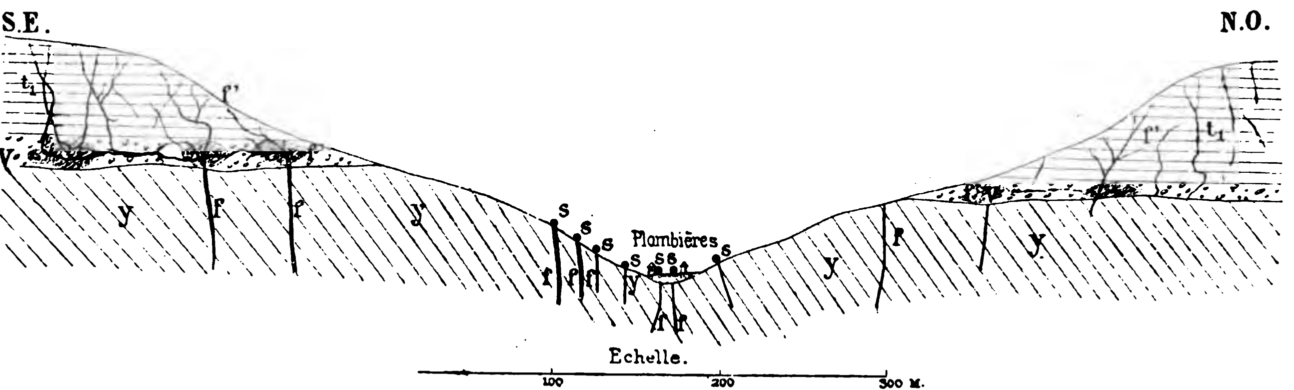


Fig. 58. — Coupe transversale de la vallée de Plombières montrant, à côté des sources thermales actuelles S, des dépôts opérés par les anciennes sources suivant trois modes différents dans trois roches différentes : 1° f f f, filons de quartz et de fluorine dans le granite y ; 2° f', amas de jaspe rouge avec quartz cristallin dans le grès des Vosges, V ; 3° f'', veines nombreuses de quartz cristallisé dans le grès bigarré t_1.

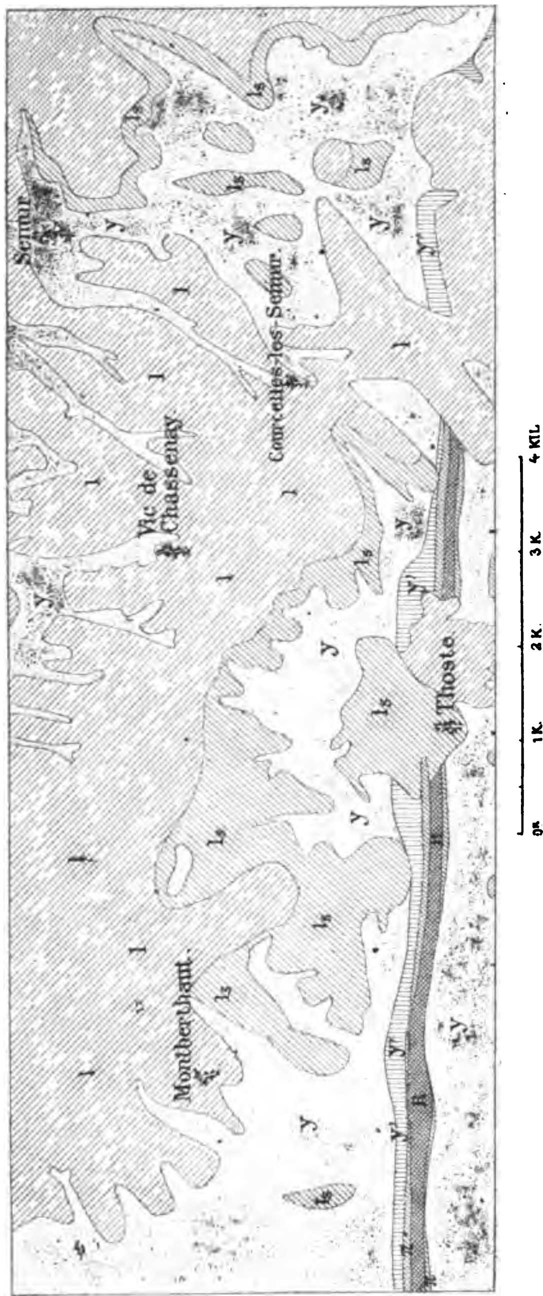


Fig. 59. — Carte des environs de Semur et de Thoste, montrant la disposition des portions silicifiées de lias ls au voisinage du granite γ et du gneiss γ'. l, lias normal; H, terrain houiller; π, porphyre. — D'après la carte de M. Guillebot de Nerville.

La pointe septentrionale du Morvan, dans les départements de la Côte-d'Or, de l'Yonne et de Saône-et-Loire, particulièrement aux environs d'Avallon et de Semur, est devenue classique par les faits démonstratifs qu'elle présente.

Les couches de l'infra-lias et du lias, qui sont immédiatement superposées aux roches anciennes et qui contiennent des bancs de grès, sont très fréquemment imprégnées de silex et de quartz cristallisé, ainsi que de barytine, de fluorine et de galène (fig. 60). Ces diverses espèces se sont substituées parfois au calcaire d'une manière com-



Fig. 60. — La plaine d'Étaules au-dessus d'Avallon, montrant la manière dont le quartz q est arrivé, par des fissures traversant la granulite y, à la surface de cette roche, où il a été recouvert par l'infra-lias r ; l_1, lias inférieur ; l_2, lias moyen ; l_3, lias supérieur ; j_1, oolithe inférieure. — D'après MM. Michel Lévy et Ch. Velain.

plète, en conservant, comme témoins du remplacement, de nombreuses empreintes de coquilles, telles que des gryphées arquées.

Dans la Côte-d'Or[1], les grès ou arkoses liasiques, d'une épaisseur de 9 à 10 mètres, sont souvent complètement silicifiés (fig. 61), tout en ayant conservé l'aspect, la couleur et la texture de la roche dont ils dérivent.

D'un autre côté, dans le voisinage des points où ces dépôts chimiques remarquables se sont développés, on rencontre çà et là dans le granite des filons quartzeux ayant la même composition.

[1] Guillebot de Nerville. *Description géologique de la Côte-d'Or.*

A ces épanchements il convient de rapporter la couche d'oligiste du plateau de Thoste, qui a environ 1 mètre d'épaisseur et qui se relie aux arkoses siliceuses des envi-

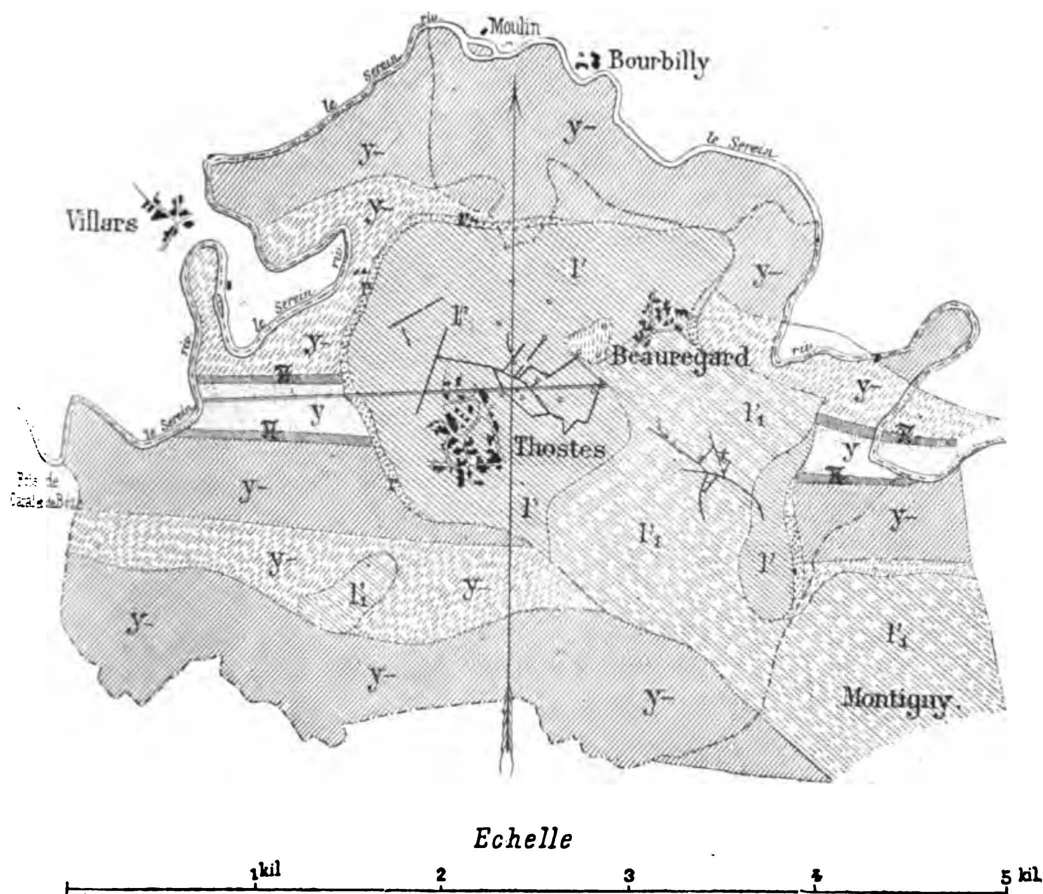


Fig. 61. — Carte géologique du plateau de Thoste; y, granite, gneiss et terrain houiller, ce dernier est en pointillé; π, porphyre; r, arkose du trias; l', lias inférieur non silicifié; l'_1, lias silicifié. — D'après M. A. Evrard.

rons, sans être toujours siliceuse elle-même. Il en est ainsi des couches ferrugineuses de Mazenet et de Nolay (Saône-et-Loire) qui sont dans l'infra-lias, mais qui, au lieu d'être anhydres, comme à Thoste, sont hydratées.

Dans le département de l'Aveyron, d'après M. Boisse[1], vers les bords des terrains secondaires et surtout quand ils reposent immédiatement sur les terrains primitifs, le grès passe à une véritable arkose. Celle-ci, qui peut acquérir une grande puissance, présente des modifications remarquables: tantôt elle consiste en grès siliceux, environs de Canet, de Bouloc, de Luc, de Mayran ; tantôt c'est un sable désagrégé où se trouvent disséminés des rognons et des amas tuberculeux de silex passant au jaspe et à l'agate; tantôt enfin il contient du fer imprégné de barytine, d'hyalite, de limonite, de sidérose et d'oxyde de manganèse, plateaux de Lunel, de Polissar, de Goutrens.

La plupart de ces gîtes, trop pauvres pour être exploités, paraissent se rattacher soit à des filons quartzeux et métallifères, soit à des roches éruptives.

A Luc, près Rodez, les arkoses siliceuses avec nodules ferrugineux sont en contact presque immédiat avec des filons de quartz chargés de fer oligiste, à proximité de porphyre.

Aux environs de Polissar et de Goutrens, les arkoses du lias se montrent sur le bord méridional du plateau granitique, en relation avec des filons de quartz ferrugineux et de barytine, et tous les minéraux de ces filons se retrouvent formant des rognons et des druses isolées, au milieu de l'arkose.

Le gîte de Lunel, situé près du filon de Kaïmar, d'abord d'une épaisseur de 2 mètres, va graduellement en s'amincissant, à mesure qu'il s'en éloigne, de sorte qu'il n'y a guère que 100 mètres de largeur exploitables sur une longueur de 1500 à 2000 mètres.

Ce filon, dont l'âge se trouve ainsi fixé, consiste en quartz

[1] *Géologie de l'Aveyron*, p. 170.

mélangé d'oligiste et de barytine, ainsi que de fluorine massive. Le quartz, de laiteux devient souvent géodique et cristallisé. Sa crête fait saillie de 5 à 6 mètres, par rapport au sol voisin, sur une longueur de 300 à 400 mètres. Il est situé lui-même à proximité de la grande faille qui sépare le micaschiste du grès rouge, en produisant un rejet de plus de 600 mètres. Son épaisseur qui est en moyenne de 7 à 8 mètres en atteint 50. On l'a exploité pour fer, sur une longueur de 350 mètres et sur environ 130 mètres de hauteur. Les anciennes eaux y ont déposé, comme témoins de leur action, des cristaux de quartz incolores et limpides, dans des géodes d'hématite, et ont moulé du quartz sur des cristaux de fluorine disparus.

Le filon quartzeux de Roc-Caillou, avec pyrolusite, sur lequel on a fait aussi des travaux, appartient au groupe de Kaïmar. Il a identiquement le même aspect que les filons quartzeux avec fer et manganèse d'Alban (Tarn).

Entre tous les gîtes de cette région, celui de Moulières, offre un intérêt particulier, par l'évidence des rapports qui existent entre le minerai ferrugineux et les filons qui traversent le terrain sous-jacent.

La coupe suivante (fig. 62) montre les conditions de gisement observées dans ce lieu. Le grès infra-liasique J_1, repose sur le granite porphyroïde Y′, en couches horizontales, recouvertes en stratification concordante par le calcaire du lias J_2. Ce grès est à grains de quartz. A la limite entre le granite et le grès se montre un filon de quartz opalin tourmalinifère, au contact duquel le grès devient ferrugineux et présente des caractères identiques avec ceux des minerais de Lunel et de Lafargues. Le ciment métallique, concentré principalement au voisinage du filon, disparaît à mesure qu'on s'éloigne de celui-ci, et il est impossible de ne pas attribuer la présence du ciment à l'action métamor-

phique du filon, imprégné lui-même de fer. Peu important au point de vue de sa richesse comme gîte métallifère, le minerai de Moulières nous montre, comme on le voit, la nature prise en quelque sorte sur le fait; il est un indice précieux des phénomènes auxquels se rattachent les grès ferrugineux observés dans l'infra-lias de l'Aveyron.

On doit encore comprendre dans la même catégorie de phénomènes, dans les départements du Gard et de l'Ardèche et dans la partie limitrophe de l'Hérault, les minerais de fer d'Ailhon et de Merzelet, de Bordezac et du Travers,

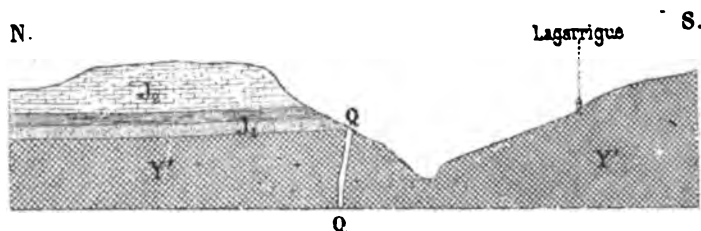


Fig. 62. — Coupe prise à Moulières (Aveyron) montrant la relation qui existe entre le filon de quartz Q et le grès quartzeux et ferrugineux infraliasique J_1 superposé au granite Y et recouvert par le calcaire du lias J_2. — D'après M. Boisse.

près Bessèges, ainsi que ceux de la Voulte; les dépôts de pyrite de Soyons et Veyras; la galène argentifère de Largentière et de Carnoules que les Gaulois ont déjà exploitée; les gîtes métallifères de Pallières et de Durfort[1]; les dépôts de calamine, avec blende et galène, de Saint-André de Lachamp, non loin de Joyeuse, et ceux des environs de Ganges et de Saint-Laurent le Minier. On peut mentionner encore les couches plombifères de Combecave (Lot), de Drège (Indre), enfin des argiles à jaspe souvent manganésifères, qui se prolongent dans la Charente, la Vienne et l'Indre, à Sanxay et à Saint-Maixent, sur les bords du terrain ancien de la Vendée. Ces jaspes avec halloysite renferment des

[1] Parran. *Annales des mines*, 5e série, t. XV, p. 47, 1860.

fossiles silicifiés et même, comme à Sanxay, des bélemnites évidées avec des cristaux de quartz à l'intérieur[1]. De meme que dans le Morvan, à proximité de ces divers épanchements, le terrain ancien montre çà et là des filons de nature analogue, par exemple à Chitry-les-Mines, où ils contiennent, avec de la galène, du quartz, de la barytine et de la fluorine.

Les filons plombifères de Pontgibaud (Puy-de-Dôme), ceux de l'Aveyron, de la Lozère et des Cévennes occidentales, à Vialas et à Villefort, datent probablement de la même époque.

Dans le département du Tarn[2], le grès bigarré, au voisinage du gneiss, a été imprégné de quartz qui en a rempli tous les insterstices et s'y est ramifié en innombrables veines ; il est accompagné quelquefois de barytine, de galène, de pyrite, d'oxyde de manganèse, comme il arrive pour les arkoses de la France centrale.

Dans la Charente-Inférieure[3], des filons métalliques traversent les étages inférieurs du lias et expirent dans les calcaires du lias moyen, sans jamais remonter dans les marnes supérieures.

Les filons de plomb encaissés dans l'étage moyen du lias, que l'on rencontre sur plusieurs points, notamment dans la bande comprise entre Alloue et Chantresac, en présentent un exemple remarquable.

Tout près de Confolens, le granite à petits grains fait place à des gneiss décomposés, qui sont traversés d'un grand nombre de filons de quartz et de pegmatite. Aux Chéronies, ces roches cristallines sont immédiatement recouvertes par un grès feldspathique ou arkose, contenant des veinules et des

[1] Grüner. *Annales des mines*, 4e série, t. XVIII, p. 86.
[2] Boucheporn. *Géologie du Tarn*, p. 57.
[3] Coquand. *Charente-Inférieure*, p. 138-141 et 198.

rognons de galène. Non loin de là, ce grès est, pour ainsi dire, remplacé par une formation de jaspe en bancs horizontaux, qui contient en quelques points de la barytine, ainsi qu'une sorte d'halloysite avec galène. A l'ancienne mine d'Alloue, à 12 kilomètres à l'ouest de Confolens, les arkoses sont superposées au granite et recouvertes par des dolomies jaunâtres du lias supérieur.

Au Montargis, un calcaire dolomitique appartenant aussi au lias inférieur, est immédiatement recouvert de bancs horizontaux d'une roche siliceuse noire avec galène et cérusite. Près de là, dans le vallon de Loumède, c'est dans

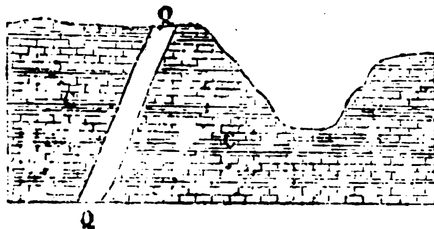


Fig. 63. — Filon Q de quartz avec galène du hameau de Lavaud, entre Montbron et Orgedeuil (Charente), coupant les assises calcaires du lias moyen C. — D'après Coquand.

un filon incliné de 60 degrés sur l'horizon et coupant le calcaire inférieur du lias que se présentent le quartz et la galène. Un filon du même genre, situé au bas de Beaumont, de 3 mètres de puissance et de 150 mètres de longueur, contient de la galène argentifère et de la blende avec quartz bréchiforme. Le filon d'Ambernac et celui du hameau de Lavaud, entre Montbron et Orgedeuil (fig. 63), représente un échantillon de ces filons.

Ainsi pendant la période liasique, l'influence souterraine s'est manifestée sur la limite occidentale du plateau granitique de la France par l'arrivée de substances métalliques et filoniennes, galène, blende, quartz et barytine, qui ont rempli les cassures survenues dans les étages inférieurs du

lias et se sont épanchées dans certaines parties des strates du même étage. Les gros filons quartzeux, et parfois métallifères, engagés dans le granite et les schistes cristallins à Chabrat, à Confolens et aux Chéronies, résultent d'émanations sans doute contemporaines de celles-ci.

Ces filons ont donné lieu à des exploitations remontant à une époque reculée[1] et que l'on a reprises momentanément de 1825 à 1827.

En résumé, comme l'a reconnu Grüner[2], partout dans notre plateau central, où le lias repose sur des terrains plus ou moins sillonnés de filons quartzo-barytiques, il est imprégné de substances étrangères : alors à la place du lias normal apparaissent des couches et spécialement des arkoses silicifiées, avec baryte, cuivre, plomb, fer ou zinc.

Sur la lisière des terrains anciens de l'ouest de la France, les couches secondaires ont reçu des émanations, comme sur la lisière de la France centrale.

Tel est le gîte de galène argentifère de Melle (Deux-Sèvres), qui a donné lieu à des exploitations très considérables[3] ; il consiste en une couche de calcaire siliceux appartenant au lias, qui est imprégné de minerai. La roche, bleuâtre ou noirâtre, plus ou moins schisteuse, passe à un jaspe schistoïde, et le minerai y est disséminé en mouches, en veinules et en petits amas. Outre la galène argentifère, on y trouve du plomb carbonaté, de la blende, de la pyrite, de la calamine, le tout mélangé de baryte sulfatée. Cette couche métallifère, à peu près horizontale, renferme des débris organisés fossiles.

Aux environs de Bressuire et Saint-Maixent le grès arkose

[1] Daubrée. Exploitation des anciennes mines métallurgiques dans la Gaule. *Revue archéologique*, p. 28, 1881.

[2] *Bulletin de la Société géologique*, 2e série, t. XV.

[3] Daubrée. *Exploitation des anciennes mines de la Gaule*, p. 24 du tirage à part.

liasique contient beaucoup de barytine et de fluorine; le silex se montre en couches continues dans des buttes, près de cette dernière localité[1].

D'un autre côté, le granite et les schistes anciens du voisinage renferment des filons de quartz avec géodes.

A Alençon même[2], on trouve une reproduction des phénomènes de contact qui viennent d'être signalés dans le centre de la France. Ce sont des bancs, sans stratification distincte, d'une roche siliceuse, tantôt à l'état de quartz jaspoïde, tantôt à l'état de quartz carié; quelquefois de la barytine s'y est mélangée et s'est substituée à des bélemnites. Une multitude de petits évidements, sont dus à la disparition d'êtres organisés. En quelques points s'y montre du kaolin en quantité plus ou moins considérable. Ces couches, qui sont très voisines du granite, ont été rapportées par M. Blavier au terrain jurassique ou au trias.

En signalant dans le massif de l'Oisans le singulier renversement du granite sur les couches jurassiques, Élie de Beaumont[3] a appelé l'attention sur la nature métallifère de ces roches, au voisinage de leur contact commun.

Quelle que soit l'inclinaison de la surface de contact, les deux roches sont devenues métallifères dans son voisinage. Il s'y trouve des nids et de petits filons de galène, de blende, de pyrite de fer et de cuivre, de barytine, de chaux carbonatée ferromanganésifère, etc. En même temps les roches secondaires sont devenues plus cristallines et plus dures, tandis que le contraire a eu lieu pour le granite. C'est ce qui arrive au-dessus du hameau des Fermonts (fig. 64). Le granite s'avance au-dessus des schistes jurassiques, de manière que sa surface inférieure présente la forme de l'intra-

[1] Cacarrié. *Géologie des Deux-Sèvres.*
[2] *Géologie de l'Orne*, p. 40.
[3] *Annales des mines*, 3e série, t. V, p. 50, 1834.

dos d'une voûte. Le gîte du Bas-de-Pic est une couche métallifère, à gangue de quartz, contenant du cuivre gris argentifère et du cuivre pyriteux et située tout près du gneiss, dans les conglomérats ou arkoses de la base du lias.

Le fait dont il s'agit paraît dépendre d'une cause intérieure, liée aux phénomènes souterrains qui ont causé le remplissage des filons métalliques. Il semble que ces substances se soient insinuées dans une solution de continuité, entre le granite et les roches stratiformes, et soient venues en souder ensemble les deux parois, ainsi que celles de toutes les fentes qui y aboutissaient.

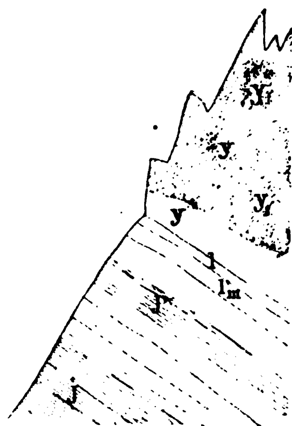


Fig. 64. — Contact du granite et du terrain jurassique, sur un flanc de la montagne de Touron, en Oisans. J et J', couches jurassiques; l, grès quartzeux renfermant de petits filons et des nids de barytine et de quartz; l'm, grès quartzeux avec quelques petits nids de galène; y, granite. — D'après Élie de Beaumont.

D'après M. Lory[1], lorsque ce granite a été soulevé et renversé en partie sur le calcaire, il n'était pas encore définitivement consolidé; la cristallisation de ses éléments n'était pas achevée. Au contact des deux roches, il y a une sorte de brèche ou conglomérat formé de débris de granite broyés,

[1] *Dauphiné*, p. 227.

et ressoudés par un ciment siliceux, qui a pu être amené par des sources thermales.

Dans toutes les contrées de la France que nous venons de parcourir, et dans bien d'autres, la jonction des roches stratifiées, spécialement celle du lias, avec les roches cristallines, a donc servi comme de lieu d'élection, lors même que, comme dans l'Oisans, l'ordre normal de superposition est interverti.

L'association si fréquente des gîtes métallifères stratifiés aux filons démontre que des apports souterrains ont fourni un contingent aux terrains sédimentaires. Aux exemples qui viennent d'être signalés, nous allons en ajouter d'autres qui, sans se lier aussi évidemment à l'acte de la sédimentation, témoignent de l'importance des émissions d'origine profonde à travers l'écorce terrestre. Ce qui s'est passé dans l'intérieur des continents doit faire supposer, par induction, qu'il en a été ainsi, aux mêmes époques, dans le bassin des mers.

A ce point de vue, l'abondance avec laquelle le quartz s'est épanché, de toutes parts, dans de nombreux et puissants filons, offre un intérêt assez grand pour que nous multipliions les exemples. Les filons de barytine et de fluorine méritent, au même titre, notre attention. Car les uns et les autres ont leur contre-partie dans l'histoire des terrains stratifiés.

Le plateau central en présente beaucoup d'exemples.

Dans le département de Saône-et-Loire[1], il arrive, comme dans bien des contrées, que des filons quartzeux se font souvent remarquer de loin, parce que se désagrégeant moins facilement que les roches granitiques encaissantes, ils forment des saillies à la surface du sol. Les plus importants se

[1] Drouot. *Saône-et-Loire*, p. 161, 1857.

trouvent aux environs de Chenas. Leur direction varie de N. 25° à 50°. C'est à leur présence qu'on attribue la grande élévation que la montagne a conservée près du village. Le plus grand de ces filons, situé au hameau du Vivier, dans la commune de Romanèche, s'étend sur une longueur de plus de 4000 mètres. Il atteint plusieurs mètres d'épaisseur; il est souvent à l'état d'agate bréchiforme. Près du filon proprement dit, le quartz a imprégné le granite jusqu'à une grande distance. Aux environs de Romanèche, au quartz qui prédomine tout à fait dans les filons, sont associés de la fluorine, de la barytine et de l'oxyde de manganèse, quelque fois en quantité suffisante pour être exploitée.

Dans le département de l'Allier[1], des masses considérables de quartz se montrent également en mamelons isolés et le plus souvent en filons, que l'on peut suivre parfois sur des étendues de plusieurs kilomètres. Le plus remarquable de ces filons se voit près de Montluçon et se dirige vers Évaux (Creuse) : la barytine, la fluorine, la galène qu'on y trouve doivent les faire rattacher aux filons quartzeux des arkoses.

Des faits semblables se présentent dans le Puy-de-Dôme.

Près de la ville de Montaigu, d'après Lecoq[2], se montre un beau filon de quartz dirigé nord-ouest à sud-est et que l'on désigne sous le nom de Pierres-Folles. Il contient des géodes de quartz cristallisé et des parties cariées. Il est souvent bréchiforme et traversé par des veines d'opale hydrophane et de quartz résinite brun, et présente également de la limonite. Ces filons se sont fait jour à travers le porphyre et se sont formés à sa suite. Ici, comme ailleurs, le porphyre, par sa sortie, paraît avoir frayé la voie à des sources silicifères et ferrugineuses.

[1] Boulanger. *Statistique géologique de l'Allier*, p. 75.
[2] Lecoq. *Puy-de-Dôme*, t. I, p. 215.

Dans le même département, la masse que l'on désigne sous le nom de Roche-Cornet[1], du nom d'un hameau situé à son extrémité sud-est, et plus souvent sous le nom de Roche-Vieille, consiste en un affleurement considérable de quartz formant plusieurs éminences. Il est en général formé de couches d'agate superposées offrant tous les caractères de la concrétion. Dans certaines parties, les masses quartzeuses ont été brisées, puis cimentées par du quartz blanc et parfois par de l'améthyste.

Près de là et à l'est, se trouve, dans la même direction, un filon de quartz, évidemment concrétionné et très curieux, en ce que les concrétions ont très souvent pour noyaux de la fluorine, généralement en octaèdres. Les enveloppes concentriques ne laissent aucun doute sur la formation de la silice par voie aqueuse.

Le filon de la Roche-Cornet se rattache à d'autres filons de quartz et de fluorine, aussi en octaèdres, qui sillonnent le pays[2].

Dans les gneiss du département du Cantal sont encaissés de nombreux filons de quartz faisant souvent saillie, à cause de leur grande résistance. Tels sont, d'après Baudin, le filon de Peyrezaô, dirigé nord-est à sud-ouest et que l'on peut suivre sur plus de 500 mètres. Le filon du Peyre, formé d'un quartz cristallin et géodique, offrant, à un degré très prononcé, l'apparence rubanée si commune aux filons, est vertical, large de 4 à 5 mètres, et on peut le suivre sur près d'un kilomètre, faisant en plusieurs points une saillie de plus de 10 mètres et barrant complètement la vallée de Beynazès. Un troisième filon, dit filon de Turlande, présente une longue et haute crête déchiquetée qui, depuis le point

[1] Lecoq. *Puy-de-Dôme*, t. I, p. 250.
[2] Fournet. *Dépôts métallifères*, p. 188.

où elle se dégage des hautes nappes basaltiques du territoire de Paulhène jusqu'aux abords de la Truyère, a environ 5 kilomètres de longueur.

D'autres filons de quartz non moins importants se voient aux environs de Laroquebron, où ils sont exploités par l'entretien des routes; d'après M. Fouqué, ils appartiennent probablement à la formation des arkoses.

Des filons de barytine sont connus en divers points du plateau central. Ils sont nombreux aux environs de Brioude (Haute-Loire) et dans le Puy-de-Dôme, au Puy-de-Chateix; quelques-uns traversent l'arkose adossé au granite.

Il en est de même pour la fluorine, comme à Paulhaguet (Haute-Loire) et en divers points du Puy-de-Dôme[1].

Des épanchements semblables aux précédents se montrent dans la Lozère. Près de la séparation des granites porphyroïdes et des schistes, on voit souvent d'énormes filons de quartz, dont la direction se rapproche beaucoup de celles des crêtes granitiques. Quoique ces filons ne renferment pas de minerai métallique, ils sont cependant en relation avec les filons métallifères[2].

Les filons quartzeux du département de la Loire et les dépôts qui s'y rattachent ont été l'objet d'études spéciales de la part de Grüner[3]. Ils traversent avec les mêmes caractères, tantôt les terrains anciens ou azoïques, tantôt le calcaire carbonifère et même le grès à anthracite du Roannais. Ils sont donc plus modernes que ces derniers. Dans tous ces terrains, les grands principaux quartzeux sont orientés du N.-O. au S.-E.

Dans le gneiss du Mont-Pilat, on peut citer deux grands

[1] Lecoq. *Ouvrage précité*, t. I, p. 131.
[2] Lan. *Annales des mines*, 5e série, t. VI, p. 419, 1854.
[3] *Annales de la Société d'agriculture de Lyon*. — *Géologie de la Loire*, p. 160 à 181 et 433 à 439. — *Bulletin de la Société géologique*, 2e série, t. XV, p. 221.

filons : celui de la Terrasse et celui de Chavanolles, l'un et l'autre dans la commune de Saint-Just en Doizieux.

Le premier, d'une puissance de 5 à 6 mètres, peut être suivi sur les deux flancs de la vallée du Dorlay sur plus de 1000 mètres. Dans toute son étendue, le quartz est saccharoïde et parfois cristallin, et alors criblé de petites géodes tapissées de pyramides à six pans. Comparativement à la masse entière du filon, les substances étrangères sont en très faibles proportions ; les plus abondantes sont la barytine, l'halloysite et la dolomie, puis la pyrite, la galène, la fluo-

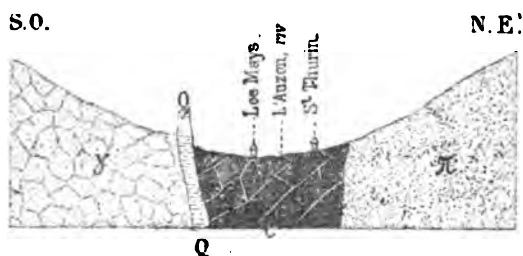


Fig. 65. — Coupe transversale de la vallée de Saint-Thurin, montrant un grand filon de quartz Q faisant saillie à la limite du granite γ et du schiste carbonifère C, lequel est sillonné de veines de quartz calcédonieux Q Q ; π, porphyre. — D'après Grüner.

rine. Au contact du filon, le gneiss ne présente pas d'indice de fusion.

Le second filon est connu sous le nom de roche de Chavanolles. D'une puissance de 3 à 4 mètres, il fait au-dessus du sol avoisinant une saillie qui va à 10 mètres. La présence assez abondante de l'oxyde rouge de fer, au milieu du quartz, prouve, comme l'a observé Élie de Beaumont, en citant le filon quartzo-ferrugineux de Chizeuil (Saône-et-Loire), que la silice, au moment du remplissage de la fente, n'était pas à l'état de fusion ignée. D'ailleurs s'il en eût été ainsi, les bases de la barytine, de la dolomie, de la fluorine n'auraient pu résister davantage à la puissante affinité de la silice en fusion.

Parmi les autres filons quartzeux du gneiss qui sont nombreux, je me bornerai à signaler les masses quartzeuses et métallifères, épanchées le long de la grande faille de Saint-Thurin (fig. 65), qui a relevé le granite au niveau du terrain carbonifère. Ce grand filon sort sur une longueur de plus de 1500 mètres et forme une longue muraille de 3 à 4 mètres d'épaisseur, au pied des coteaux granitiques. Il est connu sur une longueur de plus de 2000 mètres.

Entre Chorigneux et Sail-sous-Couzan, deux filons se séparent du granite, mais en s'en éloignant seulement de 10 à 15 mètres.

Comme il arrive souvent, les filons quartzeux de la Loire présentent fréquemment des indices d'épigénies. Ainsi dans le grand filon quartzeux de la Terrasse, des minéraux détruits ont laissé des vides, enveloppés de carcasses quartzeuses plus ou moins légères. Ces dépôts successifs de matières filoniennes correspondent à des variations dans la nature des fluides, liquides ou gazeux, qui ont présidé à la formation du filon.

En résumé, les filons quartzeux du département de la Loire et ceux des montagnes du Forez constituent un groupe très important. Ce système s'étend dans le Lyonnais, le granite du Beaujolais, dans la Creuse près Bourganeuf et dans l'Aveyron. Dans toute cette région, comme dans la Loire, ils ont une tendance manifeste, reconnue par Grüner, à s'aligner du N.-O. au S.-E.

A ces filons quartzeux proprement dits se rattachent des masses siliceuses que l'on rencontre au milieu des porphyres quartzifères, et qui ont ordinairement le caractère rubané de l'agate ou l'aspect corné de la calcédoine. Elles sont très abondantes au pied oriental du puy Montoncelle, entre Saint-Priest la Prugne et Champoly. Sur plus de 5 kilomètres, la ligne de contact du granite et du porphyre est

marquée par ces épanchements. Entre les villages de Roure et de la Gardéole, le granite est également sillonné par de semblables veines, jusqu'à une distance de plus de 2 kilomètres de porphyre. Le granite et le porphyre paraissent avoir été silicifiés lors de la formation des filons de quartz de la région.

Les émanations quartzeuses ont continué avec abondance à l'époque carbonifère. Lors de l'arrivée au jour des porphyres granitoïdes, elles se sont produites avec force. La date de leur arrivée ressort de la position des schistes siliceux et des poudingues à ciment quartzeux de Regny, Néronde et Urfé, à la limite commune de la grauwacke et du terrain carbonifère. Pendant la période peu étendue qui sépare le terrain carbonifère du grès à anthracite, l'éruption du porphyre a donné lieu à de puissantes sources siliceuses.

Plus tard, avec les porphyres quartzifères, les sources thermales siliceuses reparaissent et même plus intenses et plus nombreuses que lors de la sortie des porphyres anciens. Il se forme alors plusieurs amas de quartz concrétionné, au nombre desquels est l'important filon de la Chambodut, près Saint-Just en Chevalet. Le quartz passe quelquefois au porphyre lui-même ou plutôt il s'y perd, en s'y ramifiant indéfiniment. De nombreux dépôts siliceux se trouvent sur l'alignement du filon de la Chambodut jusqu'à une distance de plus de 3000 mètres. Des filons ou amas semblables se montrent à Essertines, à Saint-Priest la Prugne, à Monteneau près d'Ambierles, à Bully, à Cordelles et au Meynard.

Si les sources siliceuses sont le résultat des éruptions porphyriques, elles ont dû couler dans les premiers temps de la période houillère. Or, on trouve précisément dans la partie inférieure du terrain houiller de Saint-Étienne plusieurs amas de quartz calcédoine qui ressemblent à celui du

Meynard : ce sont les amas siliceux de Saint-Priest, du Mont Reynaud et de Chana, près Sorbiers.

Ainsi, chaque roche éruptive traversant les terrains sédimentaires, sous forme de dykes, est entourée d'une auréole spéciale de filons à structure concrétionnée, métallifères ou stériles. C'est moins un produit immédiat des roches elles-mêmes qu'un dépôt lent et prolongé provenant, les uns d'émanations gazeuses, les autres et le plus grand nombre, de puissantes sources minérales et thermales, dont la première origine doit être attribuée à l'apparition des masses éruptives et dont la circulation s'opérait à l'aide des fentes ou cassures du terrain.

Ces filons concrétionnés sont tantôt simples et dus à une cassure et à un seul remplissage, tantôt complexes, c'est-à-dire dus à des cassures réitérées et à des remplissages successifs, correspondants à des roches d'âge différent.

Les dépôts siliceux subordonnés, dans la même contrée, au terrain houiller, sont à rapprocher des filons, qui viennent de nous occuper.

Le plus connu de ces dépôts est celui de Saint-Priest[1]. A 3 kilomètres au nord de Saint-Étienne s'élève du fond de la vallée une butte (fig. 66) entièrement isolée, que couronnait jadis un château féodal et sur le flanc duquel se dresse encore aujourd'hui le village de Saint-Priest. Un dépôt siliceux d'une épaisseur de 5 mètres forme le sommet du cône. Ce banc épais de calcédoine recouvre des grès siliceux avec de nombreuses empreintes végétales et des parcelles de bois silicifié. La silice est donc d'origine aqueuse; elle a dû se déposer pendant un temps fort long, puisque l'épaisseur de l'amas siliceux supérieur est au moins de 10 à 15 mètres. La présence de galets calcédonieux

[1] Grüner. *Bassin houiller de la Loire*, p. 184.

dans le grès grossier inférieur paraît annoncer que le cours des sources thermales a dû être troublé momentanément. et peut-être à plusieurs reprises, par des ébranlements du sol qui auraient bouleversé les dépôts antérieurement formés. La forme conique de l'amas qui a fait supposer à quelques géologues une éruption ignée, résulte simplement de ce que le dépôt a mieux résisté sur ce point, où la silice avait durci la roche.

Sur l'autre rive du Furens et à l'est de Saint-Priest, il existe des masses siliceuses analogues et moins importantes.



Fig. 66. — Affleurement des couches siliceuses à la butte de Saint-Priest, près Saint-Étienne a, grès à fragments de quartz calcédoine, dont le bas est recouvert d'éboulis ; b, grès fin en partie siliceux avec empreintes végétales ; c, quartz calcédoine schistoïde. — D'après Grüner.

Le Petit Mont-Reynaud a son sommet coiffé d'une calotte siliceuse d'origine identique, mais dont l'épaisseur est seulement de 4 à 5 mètres. C'est une sorte de lentille plate de calcédoine, diversement nuancée, dont le grand diamètre mesure 100 mètres. Des dépôts siliceux peu différents se sont aussi formés au même niveau géologique sur d'autres points, vers le village de Chana dans la commune de Saint-Genest-Lerpet et ailleurs. Des sources geysériennes ont dû couler vers le dernier tiers de la longue période, pendant laquelle s'est déposé le poudingue stérile de Saint-Chamond.

Aux bancs siliceux en place, dont il vient d'être question,

se lient étroitement des poudingues, plus ou moins bréchiformes, formés de quartz siliceux; c'est dans ceux-ci que M. Grand'Eury a découvert, au plateau de Planèze, des restes de plantes pareilles à celles du silex en place de Saint-Étienne, et, en outre, de véritables graines et des fleurs parfaitement conservées dans leur prison siliceuse.

Ces dépôts siliceux appartiennent au même niveau que le porphyre vert sombre des environs de Givors. C'est un des nombreux exemples de la relation de ce genre de dépôts avec les roches éruptives de la période carbonifère.

Dans l'étage le plus élevé du bassin houiller de Saint-Étienne, qui appartient déjà au grès rouge du terrain permien, des lits minces siliceux (phtanite) se trouvent régulièrement stratifiés.

Delanoue a signalé[1] dans le gneiss du département de la Dordogne, à Saint-Paul et Puychalard, d'énormes filons de fer accompagnés de jaspe et d'hydrate de manganèse mamelonné, de nature absolument semblable à certaines parties des terrains secondaires. A Saint-Martin, près Thiviers, du quartz jaspe est sorti sur les confins de la serpentine.

En plusieurs points du département du Tarn, d'après de Boucheporn[2], on voit s'élever au-dessus des masses schisteuses anciennes des roches d'un aspect singulier et pittoresque, qui tantôt se dressent en aiguilles, tantôt s'étendent comme un mur linéaire bizarrement dentelé; fréquemment le sol d'alentour est jonché de leurs débris, comme le seraient ceux d'un immense édifice en ruines. Ces rochers saillants sont principalement formés de quartz, auquel sont associées quelques autres substances. Le Roc Saint-Michel, près d'Alban, présente un escarpement quartzeux d'une hau-

[1] *Bulletin de la Société géologique*, t. VIII, p. 101, 1837.
[2] *Géologie du Tarn.*

teur de 20 mètres. C'est un des affleurements d'un puissant filon quartzeux dans lequel se trouve de la barytine, de la calcite, de la dolomie, ainsi que de l'hématite brune (mine de Fraysse), des oxydes de manganèse, pyrolusite et psilomélane; ces trois dernières substances y ont été exploitées en quelques points. On peut citer encore, comme analogues, le Puy Saint-Georges, le Puy du Rouet, le Puy de Bar près Moularès et d'autres.

La carte géologique du département de la Creuse exécutée par M. de Cessac montre un grand nombre de filons quartzeux qui ont été étudiés par Grüner [1]. Il en existe un groupe au sud de Bourganeuf. Ils sont associés intimement à des épanchements d'eurite traversant le terrain houiller, sous l'influence desquels ils se sont formés. Le plus grand de ces filons est connu sous le nom de Roc de Mazuras. La paroi orientale s'élève à près de 30 mètres au-dessus du gneiss encaissant; sa largeur est de 25 à 30 mètres, et la direction N.-O. à S.-E. La longueur de la crête saillante dépasse 1500 mètres. Le quartz, qui a ordinairement une structure fibreuse, est parfois veiné comme de l'agate.

Sur la carte géologique de la Haute-Vienne de M. Mallard figurent, dans les terrains anciens, de grands filons quartzeux souvent saccharoïdes, qui sont orientés N.-O. et sont souvent aussi en saillie sur le sol. L'un des plus remarquables, celui de la Roche l'Abeille, situé dans le voisinage de la serpentine, a été décrit et figuré par d'Archiac [2].

Dans l'Aveyron les gneiss et schistes anciens ont fréquemment reçu, d'après M. Boisse [3], des infiltrations siliceuses, ainsi que des filons métallifères, au voisinage des roches porphyriques. C'est ainsi que sur le plateau schisteux de Segalat

[1] *Annales de la Société des sciences de Lyon*, p. 28.
[2] *Bulletin de la Société géologique*, t. XII, p. 195.
[3] *Annales des mines*, 5e série, t. I, 1852.

se dressent des pitons coniques ou des dykes à crêtes aiguës et dentelées. Le roc de Kaïmar dont il a été question plus haut (p. 129), les crêtes de Rocquecazière, de Roquebéral et d'autres, en sont des exemples.

Les terrains primitifs de l'Ardèche sont traversés aussi par de nombreux filons de quartz blanc et gris, souvent associés à la pegmatite, notamment près de la Gravenne de Montpezat [1].

Des filons de quartz, non moins remarquables par leur développement en épaisseur et en longueur, se rencontrent dans l'Hérault, traversant les terrains inférieurs au trias.

Pour terminer cette énumération d'exemples des filons quartzeux du plateau central de la France, qu'il serait facile de développer encore, j'ajouterai que des faits semblables à ceux qui précèdent se rencontrent jusque dans sa région occidentale. Des filons très puissants de quartz engagés dans le granite et les schistes cristallins sont particulièrement fréquents aux environs de Confolens. Entre cette localité et Étagnac [2] il en est de remarquables, par exemple à Chabrat, au Cros à 2 kilomètres au nord de Confolens, près du château de Villevert, où le granite en contient plusieurs, qui sont parallèles et sont exploités pour l'entretien des routes. Un système de filons très nombreux, composés d'un quartz hyalin zoné, traverse les protogines schistoïdes des environs des Chéronies.

L'abondance du quartz filonien se montre également dans les terrains anciens de l'ouest de la France.

En Bretagne, d'après Durocher [3], des masses de quartz en forme de massifs coniques ou d'énormes dykes et faisant saillie à la surface du sol, se rencontrent soit au milieu du

[1] D'après Dalmas.
[2] Coquand. *Description de la Charente*, p. 130.
[3] *Annales des mines*, 4e série, t. VI, p. 90, 1841.

granite, soit dans les schistes et grès de transition; c'est surtout près de la jonction des roches de ces deux catégories qu'ils sont abondants (fig. 67). Le plus souvent ils paraissent être, soit par leur alignement, soit par leur situation, en

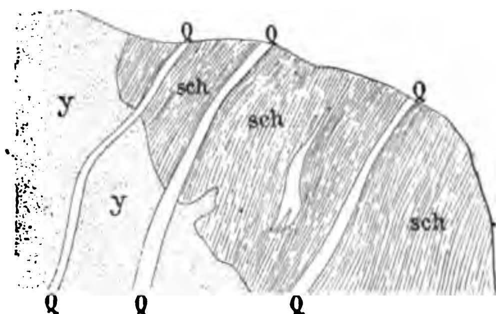


Fig. 67. — Coupe d'une tranchée faite à la Villeder, montrant des filons de quartz Q au travers du granite y et des schistes sch. — D'après Durscher, 1847.

rapport avec les éruptions granitiques, plus rarement avec les porphyres. Le gros filon quartzeux de la Villeder qui

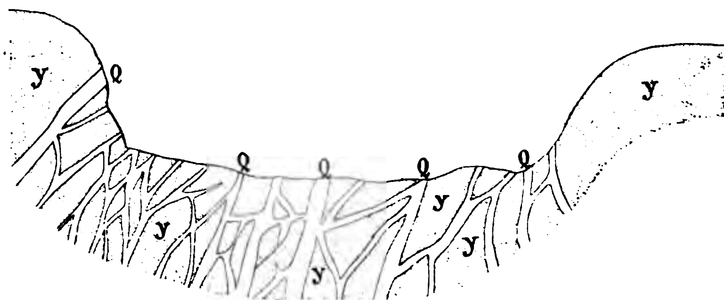


Fig. 68. — Coupe d'une grande tranchée à la Villeder, montrant dans le granite décomposé y des filons et des réseaux de veines de quartz Q. — D'après Renouf, 1858.

contient de l'étain oxydé en quelques parties en est un exemple (fig. 68).

Dans le département de Maine-et-Loire, le quartz se trouve dans toute l'étendue des terrains cristallins et de transition, en filons plus ou moins puissants. Le plus remarquable est

celui de Jouannet, commune de Martigne-Briant. Il est encaissé dans le schiste ardoisier et sa longueur est d'environ 3 kilomètres sur une largeur de 100 à 200 mètres. Il est formé de quartz blanc cristallin ou cristallisé, avec quelques parties de jaspe gris et rouge; des sources acidulées en jaillissent.

Il en est de même dans l'Orne, par exemple à Saint-Pierre d'Entremont.

Dans les Vosges, deux exemples d'épanchements quartzeux sont dignes d'attention.

Le filon d'Orschwiller[1], que l'on peut parfaitement observer à 10 mètres de l'église du village, consiste en une roche siliceuse grise ou silex corné, que traversent des veinules de baryte sulfatée cristalline et de quartz cristallisé. Dans les géodes on rencontre quelquefois du bitume solide d'un brun chocolat, substance à laquelle le silex doit peut-être sa teinte foncée. Des fissures verticales traversent le filon parallèlement à sa direction, de manière à rappeler une stratification. Son épaisseur varie de 6 à 2 mètres. Le granite tout à fait friable qui forme sa paroi occidentale en est séparé par de l'argile verdâtre ou brune.

A 500 mètres au sud du village, la baryte sulfatée, au lieu de former seulement de petites veines, comme à Orschwiller, prédomine dans le filon, tandis que le silex y est peu abondant. La baryte sulfatée est en outre mélangée de spath fluor, de galène et d'une petite quantité de chaux carbonatée lamellaire. Le silex empâte des fragments d'une roche compacte gris clair, qui deviennent très nombreux dans la partie orientale du filon (fig. 69), de sorte que ce dernier a la structure bréchiforme. La roche grise dont il s'agit présente une trace de schistosité due à la présence du mica;

[1] Daubrée. *Description géologique du département du Bas-Rhin*, 1852.

elle paraît provenir de la paroi orientale du filon et être d'origine sédimentaire. D'un autre côté, le granite porphyroïde ne se prolonge pas jusqu'au filon avec ses caractères ordinaires ; en contact avec celui-ci, on observe une pegmatite *d* formée de quartz blanc, de grands cristaux de feldspath, et contenant, au lieu de mica, des nids d'argile blanche. Quoique très compacte, cette roche est imprégnée de fluorine et de barytine. Entre le filon proprement dit *a* et la pegmatite *d* se trouve une argile d'un jaune d'ocre *c*, mélangée de grains de quartz.

Entre Orschwiller et Saint-Hippolyte, sur plus de 400 mètres de longueur, le filon forme un escarpement presque

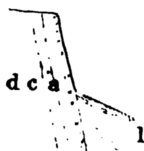


Fig. 69. — Coupe du filon d'Orschwiller a ; l, lias ; d, pegmatite ; c, argile d'un jaune d'ocre, mélangée de grains de quartz.

vertical qui atteint près de 4 mètres de hauteur, et qui domine le pays vers l'est. Cette disposition paraît résulter d'un glissement qui a fait descendre l'éponte orientale du filon. Le fait est d'autant plus probable que la salbande mise à nu offre de nombreuses stries de glissement. Le loess déposé au pied de l'escarpement empêche d'observer la roche encaissante, si ce n'est dans ce dernier village, où l'on trouve une dolomie brune ferrifère avec quelques indices peu distincts de fossiles.

Le filon d'Orschwiller se poursuit vers le sud, au delà de Saint-Hippolyte, vers Bergheim et Ribeauvillé, sur une longueur de 7 kilomètres. On peut facilement l'observer entre Saint-Hyppolyte et Oberbergheim, derrière le vieux château

de Reichenberg, et au Schülsselstein près de Ribeauvillé. Sur toute cette étendue, le filon se compose, comme à Orschwiller, de roche siliceuse, de baryte sulfatée, de chaux fluatée, de chaux carbonatée, et contient accidentellement de la galène.

A Ribeauvillé le filon se partage en trois branches, respectivement distantes de 17 et de 80 mètres; l'une d'elles s'élève verticalement de 50 mètres. On y trouve des agates rubanées, du quartz cristallisé, du quartz enfumé, du quartz améthyste; les pyramides de ce dernier sont noyées dans du quartz blanc [1]. Non loin de là le grès vosgien est traversé de veines de quartz.

La direction moyenne du filon d'Orschwiller est N. 22° E.-S. 22° O., et son inclinaison de 85 degrés vers E. 22° S.

Près de Bergheim, le quartz compact renferme de nombreuses empreintes d'encrinites, ce qui montre que la roche voisine du filon a été silicifiée. Ces empreintes paraissent provenir de l'espèce qui caractérise le muschelkalk.

Aux environs de Truttenhausen et de Saint-Nabor, c'est-à-dire à 22 kilomètres au nord d'Orschwiller, un puissant dépôt quartzeux affleure sur la limite du terrain de transition et du lias qui est juxtaposé à ce dernier. Les roches de silex corné, gris de fumée, d'une hauteur de plus de 20 mètres, qui sont exploités à 800 mètres de Truttenhausen, appartiennent à ce dépôt. La matière siliceuse y est mélangée de baryte sulfatée et de spath fluor, et renferme de petites géodes avec des cristaux de quartz. Le silex a souvent la structure oolithique; la surface des grains est couverte de cristaux microscopiques de quartz. On reconnaît dans la même substance de nombreux indices de coquilles

[1] Des blocs considérables trouvés entre Oberbergheim et la forêt Schlüsselstein ont été, à diverses époques, exploités; on en a fait des vases et on a employé ce quartz au tombeau de Napoléon, au Louvre et à l'Opéra.

bivalves et autres, dont la plupart ont disparu en laissant leur moule, et dont quelques autres ont été silicifiées. Ces coquilles, parmi lesquelles ont reconnaît des *avicula* et des *pecten* de formes peu distinctes, ont beaucoup de ressemblance avec celles du lias et de l'oolithe inférieure.

Les dépôts siliceux d'Orschwiller et de Truttenhausen sont situés sur la faille limite de la chaîne, le premier entre le granite et le trias, le second entre le terrain de transition métamorphique et le lias. C'est donc par la faille qu'est sortie la silice, ainsi que la baryte sulfatée, le spath fluor et la galène qui l'accompagnent; ces dépôts se rapprochent, par conséquent, à la fois des filons métallifères et des amas de contact. Leur formation est postérieure au lias.

Une grande analogie existe entre ces filons siliceux et celui de Badenweiler, qui est situé sur la limite occidentale de la Forêt Noire, et d'une manière tout à fait symétrique par rapport aux premiers; ce dernier est aussi plus moderne que le lias. Ces filons ressemblent aux dépôts de même composition que l'on observe dans le centre de la France.

A 9 kilomètres de Truttenhausen, vers le nord, il existe encore un accident semblable à ceux qui viennent d'être signalés. La colline située à 1,5 kilomètre au nord de Rosheim est composée, à sa partie supérieure, d'une roche siliceuse compacte, de couleur grise ou jaunâtre; du quartz hyalin cristallisé s'y rencontre dans une multitude de fissures et de géodes. En quelques points cette roche est traversée de très nombreuses veines de baryte sulfatée cristallisée de 2 à 10 centimètres d'épaisseur, qui s'y ramifient régulièrement. Cet accident occupe une superficie d'environ 2 kilomètres carrés.

Les dépôts siliceux des environs de Ribeauvillé, Bergheim, Saint-Hippolyte, Orschwiller, Truttenhausen, Saint-Nabor et Rosheim, occupent diverses parties d'une ligne faiblement

infléchie, dont la longueur est de 40 kilomètres, et qui suit à peu près la direction de la chaîne. Ainsi des épanchements siliceux se sont produits le long de la grande faille limite orientale de la chaîne des Vosges, sur plus de 30 kilomètres de longueur, et offrent des caractères différents, ceux de vrais filons et d'amas stratifiés et fossilifères, selon les conditions dans lesquelles ils ont pris naissance.

A l'ouest de la chaîne des Vosges, aux environs du Val-



Fig. 70. — Filon de quartz Q de la vallée des Roches au travers du granite γ et du grès rouge G qui est ainsi silicifié en Gr', de même que ses argilolithes en A'. — D'après M. Vélain.

dajol, il se présente des faits analogues à ceux qui viennent d'être cités sur sa limite orientale.

Au bas d'Hérival, à l'endroit même où la vallée se resserre en donnant lieu à la cluse pittoresque de la Vallée des Roches (fig. 70), les argilolithes et le grès rouge sont traversés par un puissant filon de quartz dans des circonstances que Puton a très bien fait connaître dès 1838[1]. Il contient de la barytine de la fluorine et de l'oligiste spéculaire. A du quartz d'un blanc laiteux est associé du jaspe rouge; des cristaux de quartz hyalin et d'améthyste en tapissent les cavités. Ce filon, large de 100 mètres dans ses affleurements, se poursuit dans la montagne de la Veiche, au

[1] *Métamorphoses des roches des Vosges*, 1838.

travers du grès rouge, sous forme de veinules entrelacées. Sur tout son parcours et à son contact, les argilolithes et le grès ont perdu leurs caractères de stratification; ils sont silicifiés et imprégnés par place d'oligiste, de barytine et de fluorine. Ces filons présentent une structure bréchoïde : les fragments de quartz sont ressoudés, tantôt par de l'agate zonée, tantôt par du jaspe rouge ou violet, par exemple à l'entrée de la vallée et dans le massif de la Veiche. Le quartz est apparu d'abord, puis la barytine et la fluorine, enfin l'oligiste, qui s'est déposée sur la barytine; à la suite d'une dislocation, la calcédoine, sous forme d'agate de jaspe, est venue cimenter les brèches quartzeuses. De petites cavités cubiques que le quartz contient souvent sont visiblement dus à la disparition de cristaux de fluorine.

Des faits analogues se présentent dans la même région, à La Poirie, près Remiremont.

Dans les Pyrénées, il existe, d'après Durocher[1], de grandes masses de quartz qui se présentent tout à fait dans les mêmes conditions qu'en Bretagne et qui semblent être en connexion avec le granite. On les trouve disposées sous forme de massifs coniques, de pyramides, de champignons ou d'énormes dykes, formant saillie à la surface du sol sur de grandes étendues. Elles ont été produites à la suite de l'apparition de roches plutoniques, et représentent, conjointement avec les minerais de fer, les dernières éjections qui sont sorties du laboratoire souterrain.

Les masses quartzeuses les plus remarquables se voient dans les Pyrénées-Orientales aux environs de Saint-Paul de Fenouillet (fig. 71). A la jonction du calcaire crétacé et de la bande granitique qui se trouve au midi de cette ville, on observe une longue file de petits pics ou cônes, formés de

[1] *Annales des mines*, 4e série, t. VI, 1844.

quartz, et tous placés au contact du calcaire et du granite; la ligne s'étend sur 6000 ou 7000 mètres.

En se prolongeant vers l'est cette bande quartzeuse est constamment accompagnée de minerai de fer, qui est souvent assez riche pour que l'on ait cherché à l'exploiter, comme c'est arrivé près d'Esquerde. Au-dessus de ce village est une masse de quartz (fig. 72) qui paraît avoir une épaisseur très considérable et qui est hérissée d'un grand nombre de petits pics dentelés. C'est un quartz gris, mélangé en certains points d'une substance chloriteuse verdâtre, et renfermant en assez grande abondance du fer oligiste. Le minerai est très riche dans certaines parties, mais

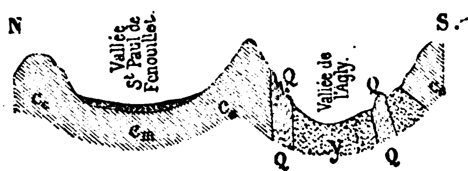


Fig. 72. — Coupe représentant la disposition des amas de quartz Q qui se sont produits au contact du granite y et du calcaire crétacé C_c, près du pont de Lafou (Pyrénées-Orientales). C_m, marnes crétacées. — D'après Durocher.

il est trop quartzeux et trop réfractaire. Dans le village même d'Esquerde une pyramide de quartz est remarquable par sa structure bréchiforme.

Le cristal de roche est désigné par Pline sous le nom de κρύσταλλος, parce qu'on le considérait comme de l'eau congelée. Dans les Alpes centrales, où dès l'antiquité ils étaient recherchés et taillés, de volumineux échantillons se trouvent dans des veines qui traversent les roches cristallines et qui paraissent dues, quoique moins clairement que les précédentes, à l'intervention de l'eau souterraine. Les fours à cristaux du Dauphiné, de Chamonix, du Grimsel, du Mont Rose, du Valais, du canton d'Uri et d'autres localités, ont fourni des prismes d'un poids at-

teignant 400 kilogrammes, comme celui du glacier de Fietsch dans le Valais, que possède la galerie du Muséum. La découverte faite dans le granite en septembre 1857, à l'est du pic du Galenstock, sur le bord oriental du glacier de Tiefen, par les habitants de Guttannen, mérite d'être rappelée. La cavité avait une longueur de 6 mètres, une largeur presque égale et de 1 à 2 mètres de hauteur : elle a fourni plus de 800 kilogrammes de quartz dit enfumé.

Des filons quartzeux innombrables coupent les schistes anciens du Taunus[1] en se dirigeant suivant N.-E. Il en est près de Wiesbaden, constituant des groupes parallèles entre eux, et dans lesquels il existe de nombreuses impressions de



Fig. 72. — Coupe représentant la disposition d'une masse de quartz Q avec minerai de fer, accompagnée de gypse gy, au contact du granite γ et du calcaire crétacé c à Esquerde (Pyrénées-Orientales. — D'après Durocher.

barytine. Près de Uesingen, il en est de 10 mètres d'épaisseur, qui renferment de la calcédoine, des cristaux d'améthyste et du quartz incohérent comme une sorte de sable.

Les filons de fer des environs de Johanngeorgenstadt et d'Eibenstock[2], dans l'Erzgebirge de la Saxe, sont tantôt isolés, tantôt en groupes ; ils se trouvent ordinairement vers le contact du granite et du micaschiste. A part des fragments des roches encaissantes, ils contiennent principalement du quartz, en partie à l'état de hornstein, parfois avec un peu d'opale, et dans lequel l'oligiste compact est en faible proportion. Leur puissance atteint 30 mètres. Ceux qui abondent

[1] F. Sandberger. *Nassau*, p. 12.
[2] Cotta. *Gangstudien*, t. II, p. 512.

dans la région granitique d'Eibenstock sont remarquables, d'après M. Oppe, par beaucoup de cristaux épigéniques que remplace du quartz de diverses variétés, et par de nombreuses empreintes de cristaux disparus. Parmi ces dernières, on reconnaît les formes de la calcite en scalénoèdre et en rhomboèdre, celles de la barytine, de l'anhydrite, de la fluorine, du quartz, de la pyrite et de la pyromorphite. La structure bréchiforme (quartz brockenfels) y est fréquente.

Sur le versant sud de l'Erzgebirge, on trouve, dans les montagnes de Carlsbad[1], des groupes considérables de filons quartzeux traversant le granite et les schistes, comme celui des environs de Sandau, qui se prolonge jusque dans le Fichtelgebirge. Il en est que l'on peut suivre sur 40 kilomètres.

Comme exemples de grands filons de quartz, je signalerai encore ceux qui abondent dans la Sierra Nevada de la Californie et dans lesquels l'or se montre çà et là. Compris dans une zone ayant à peu près 12 à 15 kilomètres de largeur, ils se prolongent du sud au nord dans toute l'étendue de la chaîne, sur plus de 250 kilomètres. Comme dans bien d'autres contrées, ils se trouvent surtout vers la séparation du granite et du schiste[2]. Le *Great-quartz-vein*, l'un des plus considérables, d'une épaisseur de 2 à 20 mètres, peut être suivi sur 50 kilomètres, faisant souvent saillie comme une immense muraille. Si l'on juge par l'immense quantité de débris de quartz de toutes dimensions qui se sont accumulés dans le gravier aurifère de la contrée, on est obligé d'admettre que cette substance est sortie avec une abondance encore bien supérieure à ce qu'indiquent les filons subsistants[3].

[1] Von Hauer. *Explication de la carte géologique d'Autriche-Hongrie*, sect. 1 et 2.
[2] Laur. *Annales des mines*, 6e série, t. III, p. 384, 1863.
[3] Marcou. *Bulletin de la Société géologique*, 3e série, t. II, p. 407.

En Australie, dans la province de Victoria, de nombreux filons quartzeux sillonnent le pays et traversent les roches stratifiées anciennes, principalement celles de l'époque silurienne, qui constituent une partie de la contrée, ainsi que les massifs de granite qui y sont intercalés. Ces filons de quartz souvent aurifère abondent partout où paraissent les roches schisteuses; ils les coupent, en même temps que les roches inférieures au terrain tertiaire. Plus de 2000 de ces filons sont connus; leur épaisseur varie depuis 1 ou 2 mètres jusqu'à 15 mètres. L'or y est associé au mispickel et à de la galène.

Pour terminer, il convient de rappeler que le quartz forme habituellement, dans toutes les régions du globe, la gangue des filons aurifères et des filons stannifères.

Il n'était pas inutile de montrer, par un certain nombre d'exemples, l'uniformité des caractères de ces épanchements quartzeux, qui témoignent si clairement de l'intervention des eaux souterraines dans une foule de localités où elles ont tari depuis longtemps.

CHAPITRE V

TRAVERTINS ANCIENS

De toutes parts, en dehors des dépôts que nous voyons se former chaque jour autour de sources, on en rencontre de bien plus nombreux encore qui ont été produits par des eaux aujourd'hui taries et dans des conditions tout à fait analogues, mais remontant à une époque antérieure, quoique géologiquement récente. Leur volume est parfois très considérable.

Le rocher des Célestins, à Vichy, attire immédiatement, par sa forme abrupte, l'attention des visiteurs. Il forme un mur à peu près rectiligne, visible sur plus de 200 mètres de longueur. On y remarque un grand nombre de plaques parallèles, sensiblement verticales. Cette crête saillante atteint 2 mètres de largeur. Les croûtes parallèles qui constituent le rocher sont de nature assez friable. Généralement elles se composent d'aragonite et de calcite fibreuse ou translucide, dont les fibres sont normales aux parois. Ailleurs la masse est plus compacte. Fréquemment on y observe des cavités allongées dans le sens vertical, comme en produiraient des bulles de gaz en se dégageant

d'une masse pâteuse. On a émis l'opinion que le rocher principal appartenait primitivement à une couche horizontale, dont un énorme fragment se serait rompu et aurait basculé. Il paraît plus probable, conformément à l'avis de M. Pigeon et de M. Voisin, que ce travertin s'est déposé en feuillets verticaux et forme la crête d'un véritable filon, dont le remplissage s'est opéré par dépôts successifs, parallèles aux salbandes comme celui de tous les filons d'incrustation. En s'écoulant à la surface, de part et d'autre de la fissure béante, l'eau minérale aurait déposé les masses de travertin qui flanquent le rocher principal. Du gaz acide carbonique se dégage, en beaucoup de points des bords de l'Allier, sur le prolongement oriental de l'alignement des Célestins.

Nous croyons devoir mentionner la localité d'où le nom de travertin est originaire. Le *travertino*[1] de sources nombreuses des environs de Rome est bien connu par l'emploi qui en a été fait dès l'antiquité, afin de remplacer le tuf volcanique dans l'édification de la capitale. Les sources Albule (fig. 73) continuent, à l'époque actuelle, le dépôt des grandes masses de calcaire de la Campagne romaine.

Le tuf calcaire qui, dans la vallée du Neckar, aux environs de Cannstadt, repose sur le muschelkalk et le keuper, est un dépôt au milieu duquel plus de cinquante sources jaillissent encore aujourd'hui, débitant plus de 25 000 mètres par vingt-quatre heures. D'après les débris organiques qui y sont enfouis en grand nombre, ce travertin appartient à l'époque quaternaire; il est antérieur au dépôt du loess. Les sources actuelles en sont la continuation.

L'Algérie se signale par l'abondance des travertins; à

[1] Ce mot est une corruption de *tiburtinus*, des environs de Tibur, aujourd'hu Tivoli.

Milianah [1] par exemple, on y trouve des débris d'une flore peu différente de la flore actuelle de la région, dans laquelle il est intéressant de signaler la présence de la vigne, du figuier et du lierre. Dans le Sahara, à El Hassi, M. Rolland a signalé un travertin calcaire atteignant $1^{m},50$ et s'étendant sur toute la largeur de la vallée, soit à peu près 500 mètres sur 1500 mètres de longueur.

Les dépôts d'onyx calcaire d'Aïn-Tekbalek ou de l'Isser, dans le département d'Oran, qui, a raison de leur beauté, ont été exploités par les anciens et plus tard par les Turcs, puis repris de nos jours, sont un exemple intéressant d'an-

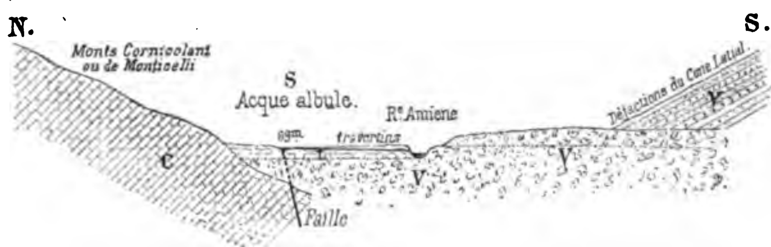


Fig. 73. — Sources Acque Albule S, entre Rome et Tivoli; C, calcaire secondaire; V, tufs volcaniques; t, travertin. — D'après M. Giordano.

ciens travertins. Les carrières sont ouvertes dans deux localités, à Bled-Roukham, où le dépôt a été séparé en trois parties par des vallées d'érosion, et à Ardja-el-Beida, à 3 kilomètres à l'ouest.

L'onyx est subordonné à un travertin ordinaire de 12 à 15 mètres d'épaisseur, dont l'allure est horizontale. On y trouve des hélices fossiles et il repose sur des calcaires miocènes moyens qui présentent une inclinaison de 15 degrés. On le considère comme étant quaternaire. Il est un point situé sur le contour des escarpements nord, où une fente

[1] *Texte explicatif de la carte géologique*, par Pomel et Pouyanne, p. 48.

remplie par un dépôt de calcite et de sidérose, paraît être la cheminée d'accès de l'une des anciennes sources calcarifères. D'après les alternances que présentent leurs dépôts, leur régime s'est modifié avec le temps. A trois époques successives, il s'est produit des conditions de tranquillité qui ont permis le dépôt de l'onyx aux couleurs variées, au lieu du travertin pierreux [1].

Des travertins incontestables se rencontrent aussi dans les terrains stratifiés; ils sont particulièrement caractérisés dans les formations tertiaires. Le bassin de Paris en présente, à différents niveaux, de calcaires et de siliceux, ainsi que l'ont reconnu d'Omalius et Alexandre Brongniart, dès le commencement de ce siècle [2]. Sézanne, Provins, la Ferté-sous-Jouarre, Champigny, Étampes en offrent des exemples bien connus.

Les couches d'eau douce de l'Auvergne comprennent également des dépôts fontigéniques.

[1] D'après une communication de M. Pallu.
[2] *Journal des Mines*, 1812.

LIVRE III

CHANGEMENTS SURVENUS DANS LES ROCHES DEPUIS LEUR FORMATION

PREMIÈRE PARTIE

TRANSFORMATIONS DIVERSES DES ROCHES

INTRODUCTION

Les roches de toute origine, stratifiées ou éruptives, ont subi depuis leur formation, non seulement des déplacements et des fractures par suite d'actions mécaniques, mais aussi des modifications plus ou moins profondes dans leur nature minéralogique.

Les terrains sédimentaires en particulier, bien que déposés comme ceux qui s'étalent chaque jour dans le fond des mers, diffèrent souvent de ceux-ci, même à première vue, par leurs caractères extérieurs. Beaucoup des changements dont il s'agit sont dus à l'action des eaux souterraines. C'est ainsi qu'il est possible de suivre, par leurs effets, comme sur une piste, l'itinéraire de ces eaux, bien qu'elles aient tari depuis longtemps.

CHAPITRE PREMIER

ÉPIGÉNIES

§ 1. — MINÉRALISATION DES FOSSILES.

Depuis leur enfouissement, les débris d'animaux et de végétaux fossiles ont subi des transformations diverses : la soustraction, l'addition et la substitution de substances, dont ils ont été ainsi l'objet, peuvent être comprises sous le nom de *minéralisation.*

Les os de vertébrés ont éprouvé une augmentation de densité très notable, qui suffit pour les faire distinguer immédiatement de ceux d'animaux actuels, et que l'on constate dès qu'on les prend dans la main. Des substances minérales ont été apportées dans les interstices qu'occupait la matière organique, avant sa décomposition, par l'intervention d'infiltrations aqueuses.

Les coquilles, les polypiers et les autres dépouilles organisées qui étaient calcaires ont fréquemment été, dans certaines couches, complètement dissoutes ; de sorte qu'il n'en reste que les moules intérieur et extérieur. Il est très

remarquable que cette dissolution se soit souvent produite dans des roches, également calcaires, qui se sont cependant conservées, tandis que les dissolvants attaquaient de préférence les débris organiques.

Le changement ne s'est pas toujours borné à une simple dissolution. Cette dernière a souvent été suivie de l'arrivée d'une nouvelle substance : ainsi on rencontre des coquilles et des polypiers, dont les formes sont parfaitement conservées dans leurs moindres détails, mais qui, au lieu d'être formés de carbonate de chaux, comme ils l'étaient certainement d'abord, consistent entièrement en quartz. Il est impossible d'admettre que les animaux, dont proviennent ces dépouilles, aient pu secréter une substance aussi différente de celle qui les caractérise essentiellement. D'ailleurs l'intérieur de ces fossiles présente fréquemment des géodes à cristaux et des formes concrétionnées, qui suffiraient pour montrer que c'est par voie inorganique que le quartz s'y est précipité. Comme autres exemples de substitution, nous nous bornerons à rappeler les bélemnites remplacées par de la barytine à Alençon et les coquilles bivalves du lias de Thoste, cardinies et autres, dont le test est entièrement transformé en oligiste cristallisé, à clivage spéculaire et rappelant celui des volcans.

Les bois silicifiés que l'on rencontre très fréquemment sont encore plus instructifs. Non seulement leur forme extérieure et leur texture en font reconnaître l'origine végétale, aux yeux les moins exercés; mais ils en ont conservé la structure intime, souvent aussi distincte que dans le bois vivant, ainsi qu'il est facile de le constater, si l'on en examine au microscope une plaque assez mince pour qu'elle soit transparente. Ce n'est donc pas un simple moulage opéré dans le vide qu'aurait laissé la disparition du bois; mais une substitution graduelle et lente.

On peut ajouter que le ligneux n'a pas toujours été totalement remplacé par le quartz; il en reste encore parfois des vestiges. Il est des tiges formées, en partie de ce dernier minéral, en partie de lignite, où l'on voit que l'opération s'est arrêtée avant d'arriver à son terme.

Au lieu de quartz ou silice anhydre, c'est parfois la silice hydratée ou opale qui s'est substituée au bois.

Les bois silicifiés présentent quelquefois des cavités, tellement identiques aux canaux que les tarets creusent actuellement dans les bois submergés que leur origine ne serait



Fig. 74. — Bois silicifié, avec géodes de quartz. — Demi-grandeur. Échantillon du Muséum.

pas douteuse, alors même qu'on n'y trouverait pas fréquemment les coquilles de ces mollusques. Ces cavités sont, tantôt restées vides, tantôt remplies de quartz cristallisé (fig. 74); mais ce remplissage n'a eu lieu que postérieurement.

Les bois silicifiés sont extrêmement communs dans certains gisements, dont quelques-uns sont d'un âge tout récent. La forêt silicifiée du Caire en offre un exemple remarquable. Sur une étendue de plus de 100 kilomètres entre le Caire et Suez, le désert est couvert de troncs d'arbres passés à l'état d'opale. Quelques-uns ont 12 à 15 mètres de longueur. On

ne saurait distinguer des espèces actuelles les palmiers et les sycomores qui y prédominent. Ils occupent encore la place où ils ont vécu et leur ensemble rappelle une forêt abattue par le vent. Bien que superficiels, ils doivent leur état siliceux à l'action d'eaux souterraines; un décapement postérieur du terrain les ayant mis a nu[1].

Dans l'Allier, le terrain tertiaire supérieur renferme de nombreux bois parfaitement silicifiés, dont l'aspect est identique aux bois que le bûcheron viendrait d'abattre[2].

La forêt silicifiée de Portland est un exemple classique du même fait, qui remonte à l'époque, beaucoup plus ancienne, du terrain jurassique supérieur. Ici les arbres encore debout ont leurs racines dans une couche noire, sorte de terre végétale fossile (*dirt bed*).

Les végétaux silicifiés du terrain houiller de la Loire et de Saône-et-Loire, quoique se présentant d'ordinaire comme des blocs informes, ont conservé, jusque dans leurs détails microscopiques, la structure des végétaux dont ils dérivent. Ils ont permis aux botanistes et surtout à M. Renault, à la suite d'Adolphe Brongniart[3], de faire l'histologie des plantes houillères dans leurs organes les plus délicats.

Des forêts silicifiées conservées sur place, bien que remontant à la période reculée dont il s'agit, ont été reconnues en divers lieux. Il en est une, d'une vaste étendue aux environs d'Adersbach en Bohême, qui a été décrite par Goeppert[4].

Il n'y a pas de doute que, dans bien des cas, les végétaux

[1] Ehrenberg; voir aussi Itier. *Bulletin de la Société géologique*, 2e série, t. XXV, p. 277.

[2] Boulanger. *Statistique de l'Allier*, p. 221.

[3] A. Brongniart. *Études des grains silicifiés du terrain houiller.* — Beaucoup de ces végétaux se rencontrent sous forme de menus galets, dont l'aspect ne ferait aucunement soupçonner l'intérêt.

[4] Breslau, 1857.

étaient encore en place, lorsque leur silification s'est effectuée : M. Newbold a trouvé des souches d'arbres debout et fixées par leurs racines, dans les grès qui supportent les forêts silicifiées du Caire.

Un banc de quartz chargé de débris de végétaux houillers silicifiés se montre dans le département de l'Allier, à Bussières, à Ygrande, à Noyant et a été retrouvé par M. Renault[1], sur plus de 30 kilomètres d'étendue. A Saint-Hilaire, à l'étang des Messarges, se rencontrent des troncs de *Psaronius giganteus* encore en place et tenant au sol.

Dans des fragments de troncs de *Sigillaria xylina* silicifiés, la silice a exsudé et s'est solidifiée, sous la forme de gouttelettes, qui tapissent l'intérieur de l'étui médullaire, dont la moelle avait déjà disparu.

La délicatesse des tissus conservés paraît indiquer que la température de l'eau qui dissolvait la silice n'était pas très élevée.

Le quartz est le minéral qui a le plus fréquemment pris la place des corps organisés et spécialement du bois; mais il n'est pas le seul. La pyrite de fer, la limonite, plus rarement la barytine, les carbonates de cuivre bleu et vert et d'autres substances ont joué un rôle analogue.

Les empreintes houillères de Petit-Cœur, de la Diosaz, de la dent de Morcles et d'autres localités des Alpes, sont remarquables par un enduit blanc, nacré, qui s'est substitué aux feuilles, en conservant tous les détails de leurs nervures. Cet enduit cristallin consiste en un silicate d'alumine hydraté, voisin du kaolin et de la pholérite, comme l'a appris l'analyse de M. Terreil[2].

Il n'est pas douteux que l'eau ne soit également intervenue dans la transformation des végétaux enfouis, en com-

[1] *Cours de botanique fossile*, p. 81.
[2] *Comptes rendus*, t. LIII, p. 120-1861.

bustibles fossiles, et spécialement en anthracite et en houille.

Sans que le fossile lui-même ait été transformé chimiquement, la pénétration de certains minéraux dans les cavités que son corps a occupées montre tout aussi clairement l'infiltration de l'eau. Ainsi les nautiles et les ammonites présentent une série de concamérations, séparées par



Fig. 75. — Ammonite dont les concamérations ont été incrustées de pyrite et de calcite cristallisées. — Demi-grandeur. Collection du Muséum.

des cloisons que traverse un canal. Tandis que la chambre antérieure où se trouvait logé le corps de l'animal, dans la dernière période de sa vie, s'est simplement remplie de la boue, au milieu de laquelle sa dépouille était enfouie, les chambres suivantes (fig. 75) ont reçu diverses substances, chaux carbonatée, strontiane ou baryte sulfatée, pyrite, qui s'y présentent souvent en cristaux très nets.

§ 2. — PSEUDOMORPHOSES INORGANIQUES.

Dans beaucoup de gisements, des substances cristallisées ont été remplacées par d'autres, qui ont épousé leurs formes géométriques, par une sorte de moulage. Ces pseudomorphoses ou épigénies sont, le plus souvent, des effets chimiques dus aux eaux souterraines dont elles éclairent la nature.

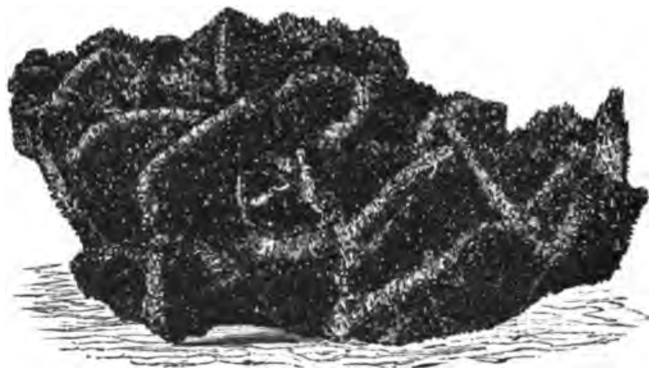


Fig. 76. — Quartz hyalin affectant une forme en tables rhombes, caractéristique de la barytine. Demi-grandeur. Collection du Museum.

Elles se rencontrent dans les gisements les plus variés. On a vu qu'elles abondent dans les filons quartzeux de nombreuses localités, particulièrement dans ceux de la Roche Cornet. La figure 76 représente un exemple très fréquent d'épigénie : c'est du quartz affectant la forme cristalline de la barytine en tables rhombes. Elles ont été de la part de bien des minéralogistes distingués[1] l'objet d'études spéciales, auxquelles nous ne pouvons que renvoyer.

[1] Par exemple, Zippe, 1834; Blum, 1843 à 1863; Haidinger, 1844; Scheerer, 1853; Winckler, 1855; Kjerulf, 1855; Delesse, 1859.

CHAPITRE II

FORMATION DES ROGNONS

C'est aussi à des changements ultérieurs, également produits sous l'influence de l'eau, que l'on doit attribuer la formation de concrétions arrondies, confondues parfois avec des productions organisées, bien qu'elles soient entièrement minérales. Elles sont très fréquentes et connues sous le nom de *rognons*.

Le quartz appartenant à la variété dite silex se présente fréquemment sous cette forme. A certains niveaux la craie blanche en contient beaucoup, dont la configuration est essentiellement tuberculeuse, et qui sont alignés suivant des plans parallèles à la stratification, ainsi qu'on peut le voir dans les carrières de Meudon, ou bien, plus en grand, le long des falaises de la haute Normandie depuis le Bourg-d'Ault jusqu'à Étretat.

Ces rognons de silex n'existaient pas lors du dépôt de la craie; ils se sont produits postérieurement, quand les couches de craie où ils sont disséminés étaient déjà formées.

Ce qui le démontre, c'est d'abord leur forme irrégulière et ramifiée qui ne s'expliquerait pas dans une hypothèse

différente. De plus, le silex qui constitue ces rognons a très souvent empâté des fossiles, qu'il a partiellement remplis. Il est à ajouter que, dans ce cas, le têt calcaire des coquilles n'a généralement subi aucune altération, comme il serait arrivé, si des liqueurs acides, même à faible degré, fussent intervenues. Les vides que présentent parfois ces silex sont tapissés, soit d'une sorte de calcédoine mamelonnée, soit de cristaux très nets de quartz hyalin.

Des concrétions analogues se sont produites dans bien d'autres niveaux, par exemple dans les couches jurassiques



Fig. 77. — Orbicules siliceux occupant la place du têt d'une gryphée arquée silicifiée Grandeur naturelle. Collection du Muséum. — A gauche, des orbicules isolés.

où en certaines parties de la France, elles sont connues sous le nom de *chailles* et de *charveyrons*.

Il y a un demi-siècle la tendance de la silice à prendre la forme d'orbicules isolés et à zones concentriques (fig. 77) a attiré l'attention d'Alexandre Brongniart.

Plus rarement la silice ainsi concrétée est hydratée, c'est-à-dire combinée à de l'eau ou à l'état d'opale. Dans le bassin de Paris, des marnes au niveau du calcaire de Saint-Ouen et à celui des marnes à gypse, en donnent un exemple bien connu. Ces rognons, de la variété d'opale dite *ménilite*, d'après le nom de Ménilmontant, localité où ils ont d'abord été étudiés, offrent à peu près les formes des rognons



ROGNON CLOISONNÉ (SEPTARIA)
Constitué par du calcaire dans les fissures duquel la calcite a cristallisé. $\frac{1}{2}$ grandeur
(Collection du Museum.)

de silex. Il n'est pas rare de voir les feuillets de la stratification se continuer, par une sorte de clivage, au travers des rognons, qui reproduisent ainsi fidèlement la structure des marnes, au milieu desquelles ils se sont solidifiés et auxquelles ils se sont en partie substitués. C'est une preuve de plus que les rognons sont postérieurs aux couches qui les renferment.

La silice n'a pas le privilège exclusif de se présenter en rognons. Il existe des concrétions calcaires, analogues par la forme et sans doute par le mode de production, par exemple, dans les marnes du lias. Les dépôts quaternaires les plus récents, comme le limon diluvien connu sous le nom de loess, en présentent fréquemment. Le carbonate de chaux qui y est mélangé à de l'argile et à du sable s'en est isolé sous forme de tubercules, désignés parfois sous le nom de poupées ou de *loesskindchen*. Leur intérieur s'est ordinairement évidé, fendillé et gercé, par suite d'un retrait dû probablement à la dessication. Il n'est pas rare que des cristaux de quartz et autres se soient déposés sur ces cloisons internes.

Le nom de septaria a été donné autrefois à beaucoup de ces rognons (de *septum*, cloison).

De même, le fer carbonaté ou sidérose se présente souvent en rognons, particulièrement en abondance dans les argiles du terrain houiller, où on l'exploite dans plusieurs comtés de la Grande-Bretagne et dans d'autres pays. Des débris de végétaux et d'animaux, tels que des poissons et des coprolithes, ont souvent servi de centres à ces concrétions. Des rognons ou ovoïdes de limonite résultant de la décomposition de la sidérose abondent à certains niveaux, par exemple dans les marnes liasiques. Ordinairement composés de couches concentriques il n'est pas rare qu'ils contiennent au centre un noyau mobile ou une matière pulvérulente de même nature. Ces géodes étaient très recherchées sous le nom

d'aétites ou de pierres d'aigles, par les anciens qui les considéraient comme des remèdes.

La strontiane sulfatée ou célestine, qui se montre également en rognons à divers niveaux géologiques, s'est produite dans des conditions semblables.

C'est aussi sous la forme de rognons irréguliers que la phosphorite se présente habituellement dans les terrains stratifiés.

Enfin on peut citer des rognons de pyrite ou bisulfure de fer très abondants, par exemple, dans la craie de la Champagne, dans l'argile plastique des environs de Paris, les schistes bitumineux de Ménat (Puy-de-Dôme) et en général dans les roches charbonneuses. La surface de ces boules est souvent hérissée de sommets cristallins qui correspondent à une structure intérieure radiée. Quand on rencontre de telles boules isolées à la suite de dénudations, à la surface de roches qui en diffèrent à tous égards, on est parfois tenté de croire qu'elles sont tombées du ciel; de là le nom de pierre de foudre ou d'aérolithes qu'on leur donne dans plusieurs de nos provinces, telles que la Champagne, la Picardie et la haute Normandie.

Dans ces divers cas, la substance qui s'est concrétionnée paraît avoir subi l'influence d'un véhicule liquide, tel que l'eau d'imbibition des roches ou eau de carrière. La tendance que la matière dissoute avait à se réunir en sphère, sous l'influence de l'attraction, a ordinairement été contrariée, notamment par l'inégale résistance de la masse dont elle devait s'isoler; de là les formes tuberculeuses si fréquentes.

En reconnaissant que ces rognons de diverses substances sont postérieurs au terrain, il y aurait lieu de se demander comment ils ont pu repousser une matière, qui avait déjà acquis une certaine consolidation et s'y substituer en quelque sorte, comme si elle avait dû cette puissance à la force d'attraction.

CHAPITRE III

FORMATION DES BIGARRURES ET DES VEINULES

Certaines couches de grès bigarré doivent leur dénomination à des veinules d'hydrate de peroxyde de fer ou limonite, qui s'y ramifient très irrégulièrement. Cette disposition s'est reproduite jusqu'à nos jours, dans des sables d'alluvion de nature ferrugineuse, où le fer subit journellement des dissolutions et des précipitations. L'influence des eaux souterraines est manifeste. Parfois elle a été favorisée par des matières végétales en décomposition, ces dernières aidant à la dissolution, par une réaction toute semblable à celle que nous avons décrite en rendant compte du minerai de fer contemporain.

Les veinules si fréquentes dans les calcaires et bien connues dans les marbres, auxquels ils doivent des colorations agréables à l'œil, quoique se rapportant encore à la circulation souterraine des eaux, ont une origine différente.

La roche tout d'abord homogène a subi des actions mécaniques, qui y ont ouvert des réseaux de fissures ou lithoclases, parfois disposées en deux ou plusieurs systèmes

parallèles qui s'entre-croisent[1]. Le plus souvent irrégulières et de petite dimension, elles ont reçu le nom de leptoclases[2], pour les séparer des cassures plus considérables.

Les dépôts de substances en dissolution aqueuse, qui ont progressivement rempli ces fractures diverses, représentent une sorte de sécrétion, qui a réalisé comme un départ dans les éléments constitutifs de la roche. De là le contraste entre la pâte et les veines ou veinules, au double point de vue de la composition et de la structure.

On sait, en effet, que dans les marbres dits veinés simples, la calcite purifiée, blanche et cristalline, tranche à première vue sur la pâte amorphe et diversement colorée.

Cette structure est des plus fréquentes dans les régions disloquées, comme dans les Alpes, où on la reconnaît à chaque pas et sur des dimensions considérables, dans les escarpements où la brèche se montre coupée à vif (Diablerets.)

Dans les marbres veinés composés, tels que ceux de Campan, c'est un effet inverse qui s'est produit. L'argile et les impuretés primitivement mélangées à la roche s'en sont séparées et ont été repoussées, sous forme de nombreuses veinules, lorsque le calcaire a pris un grain cristallin.

Ce n'est pas seulement dans les calcaires proprement dits, mais aussi dans les roches calcarifères que les veinules ont pris naissance. La mollasse suisse en offre souvent l'exemple, par exemple près de Clarens, dans les carrières de Baugy et de Tavel.

Les veinules de gypse fibreux, qui s'anastomosent dans les argiles, accusent des sécrétions du même genre.

Les phyllades, schistes dont les ardoises représentent une variété bien connue et consistant essentiellement en silicates d'alumine, ainsi que les quartzites, sont très souvent

[1] Par exemple dans certains marbres griottes.
[2] *Bulletin de la Société géologique*, 3e série, t. X, p. 136, 1881.

traversés par des réseaux de veinules, dont l'aspect rappelle ceux des marbres, mais consistant en quartz pur. Dans les quartzites de Sierck (Lorraine), des Ardennes, des bords du Rhin, de Bretagne (le Roule), des Alpes, du val d'Anniviers au-dessus de Saint-Luc où elles se montrent sur plus de 200 mètres de hauteur, les veines de quartz se distinguent également de la pâte, qui est souvent colorée en gris ou en rouge, par une teinte plus pâle et par un état plus cristallin.

Il arrive de rencontrer ensemble en veinules, le quartz cristallisé et la calcite, comme dans les phyllades du col de Balme.

Malgré l'insolubilité habituelle de la silice, ces accidents résultent, aussi bien que les veines des marbres calcaires, d'une sécrétion par voie aqueuse, mais supposant nécessairement l'intervention de la chaleur. Les expériences dans lesquelles l'eau suréchauffée a décomposé les silicates, avec production de silice libre et cristallisée, explique complètement les faits dont il s'agit[1], comme nous le verrons plus loin.

[1] *Géologie expérimentale*, p. 224.

CHAPITRE IV

ALTÉRATION CHIMIQUE DES ROCHES SILICATÉES: ALUNITE; KAOLIN; SERPENTINE

Il est bien d'autres roches silicatées que les phyllades qui ont éprouvé des modifications, depuis l'époque où elles se sont formées.

Les roches amygdaloïdes, dans les boursoufflures desquelles des zéolithes et d'autres minéraux se sont développés, nous en ont offert un premier exemple. Ces minéraux représentent en général, comme un extrait et une sécrétion de leur substance. La terre verte en particulier paraît dériver clairement du pyroxène.

L'origine des anciens dépôts d'alunite, tels que la brèche sulfurifère du haut de la vallée du Mont-Dore, à la base du Pic de Sancy, ceux de la Hongrie et de la Tolfa, s'explique par la formation actuelle de la même substance, au voisinage d'émanations sulfurées.

L'acide sulfhydrique qui s'exhale souvent des profondeurs se brûle et se convertit en acide sulfurique, en présence de matières poreuses, comme Dumas l'a reconnu dans le tissu des rideaux des cabinets de bain d'Aix en Savoie; les ro-

ches peuvent opérer la même oxydation dans leurs pores.

Une modification des tufs trachytiques a été causée en Hongrie, dans la contrée de Tokay, par l'acide sulfurique. Il en est résulté des sulfates, dont l'un est l'alunite, sulfate hydraté de potasse et d'alumine, l'autre beaucoup plus rare, la barytine. Dans la coupe (fig. 78) que nous empruntons à M. Szabo[1], la couche t est transformée en alunite, dans des parties où se trouvent des empreintes de cérithes, de manière à ne laisser aucun doute sur la transformation qui est survenue dans les couches trachytiques sédimentaires. L'acide sulfurique a déplacé l'acide silicique. Comme d'or-



Fig. 78. — Coupe de la montagne Megyer à Saint-Patak, environs de Tokay, montrant les altérations subies par les roches trachytiques. T conglomérat trachytique, cimenté par du quartz poreux qu'on exploite pour pierre meulière ; t tuf avec opale et alunite, stratifié horizontalement et fossilifère. D'après M. Szabo.

dinaire la région ainsi imprégnée est très limitée. Une formation semblable d'alunite se rencontre dans tous les groupes trachytiques de la Hongrie ; mais c'est surtout à l'est de celui de Tokay-Eperjes, à Beregszasz, qu'elle est le mieux développée. Les solfatares de Pouzzoles, de Vulcano de Milo et du Chili[2] nous fournissent une reproduction du phénomène.

La réduction du feldspath en kaolin représente un autre mode de transformation bien connu. Elle n'a pas toujours eu lieu par les agents de la surface, comme on l'admet quelquefois. Il est des cas où il paraît y avoir eu interven-

[1] *Association française*, Alger, 1881.
[2] *Les eaux souterraines à l'époque actuelle*, t. I, p. 414 et t. II, p. 68.

tion d'émanations aqueuses et autres, originaires des profondeurs, comme pour les gisements de Cornouailles liés aux amas de minerais d'étain. Tel serait encore, d'après M. Ed. Fuchs, le cas pour le kaolin de la Tolfa, qui se serait formé en même temps que l'alunite.

Les serpentines paraissent être aux roches silicatées magnésiennes ce que le kaolin est au feldspath. On assiste pour ainsi dire à l'hydratation du péridot sur les gros cristaux de Snarum, et mieux encore, quand on examine au microscope la pâte des roches péridotiques et pyroxéniques, où se présentent des transitions graduelles et variées du silicate anhydre au silicate hydraté.

DEUXIÈME PARTIE

MÉTAMORPHISME

L'écorce terrestre présente dans sa constitution générale de grandes masses minérales ou roches qui, par l'ensemble de leurs caractères, se groupent en deux grandes catégories.

D'un côté les roches dites stratifiées, qui ne sont autres que des sédiments formés autrefois par la mer, lorsqu'elle occupait les régions où nous les constatons aujourd'hui, sédiments qui se sont accumulés sur des épaisseurs de plusieurs milliers de mètres pendant la série des périodes géologiques. Beaucoup plus rarement, ce sont des sédiments opérés par des lacs d'eau douce.

D'un autre côté, des roches qui se sont souvent intercalées dans les premières, poussées qu'elles étaient de bas en haut, et qui sont en raison de leur origine désignées sous le nom d'éruptives.

Dans diverses régions, on rencontre des roches participant à la fois à certains caractères de ces deux grandes catégories. Tout en étant stratifiées, elles sont souvent parsemées de silicates cristallins et anhydres, qui sont étrangers aux roches stratifiées normales.

Ces roches à caractères mixtes ont-elles été formées telles qu'on les voit? C'est ce qu'on a pensé tout d'abord, selon la doctrine de Werner. Mais dès 1785, un géologue des plus éminents, Hutton, se basant sur les observations qu'il avait patiemment recueillies dans les montagnes de l'Écosse, démontrait, entre autres faits fondamentaux, que ces roches sont des sédiments ultérieurement modifiés par la chaleur : de là, le nom de roches *métamorphiques* qui leur a été donné plus tard.

Les roches métamorphiques représentent en général des changements d'un caractère différent de ceux que nous avons signalés plus haut. Les silicates anhydres et cristallins qui y ont souvent pris naissance accusent l'influence d'une température assez élevée lors de leur formation. C'est comme une phase plus avancée dans les changements que les roches stratifiées ont subis et qui les rapproche parfois assez des roches cristallines pour que le caractère originel de l'ensemble ait complètement disparu.

Souvent les roches métamorphiques sont cantonnées à proximité de roches éruptives. Quelquefois aussi les modifications se manifestent loin de toutes roches éruptives et sur de grands espaces. Ces deux gisements, qui d'ailleurs présentent certaines transitions de l'un à l'autre, sont caractérisés par les dénominations de métamorphisme de *juxtaposition* ou de *contact* et de métamorphisme *régional*.

Pour montrer que l'eau souterraine est intervenue dans beaucoup de ces phénomènes je me bornerai à un petit nombre d'exemples.

CHAPITRE PREMIER

MÉTAMORPHISME DE JUXTAPOSITION OU DE CONTACT

Quand une roche a fait éruption des profondeurs, les couches qu'elle traverse ont souvent été modifiées dans son voisinage. Quelquefois cette modification des roches encaissantes est réduite à une lisière très mince, de quelques millimètres et les changements produits sur cette faible épaisseur sont même peu prononcés. Dans d'autres cas, et particulièrement quand la roche qui a opéré est de nature granitique, l'étendue de la zone modifiée, aussi bien que les changements plus complets qui y ont été opérés, dénotent une nature beaucoup plus énergique

Comme exemple de minéraux développés par le métamorphisme dans le voisinage de roches éruptives, je signalerai d'abord celui de zéolithes produites à proximité de roches basaltiques.

En Auvergne, au Puy de la Piquette, des blocs de calcaire d'eau douce sont empâtés dans un conglomérat basaltique, lequel est lui-même traversé par des filons de basalte. Or, çà et là, des cristaux très nets de mésotype se sont produits dans ce calcaire, qui certainement ne les renfermait pas

lorsqu'il s'est déposé et avant qu'il fût en contact avec le basalte. Des faits semblables s'observent à Gergovie. Ils sont analogues à ceux que nous avons déjà mentionnés dans les îles Cyclopes.

Le grès qui avoisine le basalte a souvent acquis des caractères particuliers. Il a pris la structure prismatique par l'effet d'un retrait, comme il arrive aux grès du creuset ou ouvrage des hauts fourneaux à fer, que l'on retire après une campagne. Il a en outre un aspect vitreux, et comme fritté. Mais, ce ne sont pas seulement des effets de la chaleur que ce grès a subis dans certaines localités. Car, comme l'a reconnu Delesse, il fait gelée aux acides, et il s'est imprégné d'une substance ayant de l'analogie avec les zéolithes. Tel est le cas à la côte d'Essey (Meurthe-et-Moselle) et à Wildenstein près Büdingen, en Vétéravie. Cette imprégnation sur la lisière du filon basaltique est évidemment postérieure à l'intercalation du basalte et par conséquent à la formation du grès. C'est un fait qui rappelle la formation de la mésotype dans le calcaire d'eau douce.

Il est une localité célèbre, à cause des échantillons minéralogiques qu'elle a fournis à toutes les collections. C'est Monzoni en Tyrol, dont Léopold de Buch avait dejà signalé le haut intérêt. A proximité d'une roche syénitique particulière, à laquelle on a donné le nom de monzonite et qui est formée d'orthose, de plagioclase, d'amphibole, de mica et de magnétite, les couches du muschelkalk supérieur, bien qu'ayant conservé leur horizontalité, ont éprouvé des transformations variées. Sur une certaine épaisseur elles ont pris l'aspect d'un marbre blanc, parce qu'il s'y est développé d'innombrables lamelles nacrées de brucite ou hydrate de magnésie. Plus près de la roche éruptive normale se rencontrent de la serpentine, du mica magnésien, de l'idocrase, du pyroxène (variété fassaïte), de la gélehnite, de la wollas-

tonite et du spinelle pléonaste. La roche éruptive elle-même paraît avoir contribué, par des transformations qu'elle a subies aussi, à la formation de plusieurs de ces espèces minérales[1].

Au lieu d'admettre avec le baron de Richthofen une fusion commune des deux roches, M. de Lapparent est arrivé à la conclusion que les actions de contact de la monzonite rentrent essentiellement dans le domaine des phénomènes chimiques de la voie humide. Des dissolutions pouvaient seules opérer, dit-il, le mélange des éléments du calcaire avec ceux de la roche éruptive sans altérer la forme de la surface de jonction; elles seules pouvaient posséder assez de mobilité pour permettre aux substances de se grouper suivant leurs affinités; elles seules pouvaient déterminer la cristallisation, à l'état d'hydrate, de la magnésie contenue dans le calcaire.

Des faits du même genre, que M. Lepsius a bien fait connaître[2], se présentent non loin d'Adamello (fig. 79). Le diorite quartzifère appelé tonalite s'est intercalé dans le muschelkalk, et l'on peut suivre la surface de jonction sur une hauteur de 600 mètres. Dans le calcaire devenu cristallin et sur une zone dont la largeur varie de 500 à 1100 mètres, il s'est produit des minéraux variés : quartz, tourmaline, grenat, épidote, pyroxène fassaïte, hornblende, idocrase, wollastonite, pyrite, etc. L'auteur conclut également que l'eau paraît avoir été ici un agent de transformation.

On connaît les jaspes de couleurs variées qui, en Toscane, sont si habilement mis en œuvre dans la fabrication des mosaïques dites de Florence. Ces jaspes rouges (gabbro rosso), jaunes, verdâtres, gris, consistent en quartz impur,

[1] De Lapparent, Constitution géologique du Tyrol méridional. *Annales des Mines*, 6e série, t. VI, p. 245, 1864.

[2] *Das Westliche Sud-Tyrol*, 1878.

souvent hydraté. Ils se sont produits dans des roches stratifiées et appartiennent généralement au terrain crétacé. Ces imprégnations siliceuses se rattachent d'ailleurs à la formation de gîtes métallifères. De ces épanchements quartzeux on pourrait en rapprocher bien d'autres, parmi lesquels nous nous bornerons à citer ceux de la Hongrie, aux environs de Tockay, où la silice au lieu d'être à l'état anhydre est hydratée ou à l'état d'opale.

Ces sédiments trachytiques occupent, d'après M. Szabo[1],



Fig. 79. — Vue du Monte-Boja dans le val Bondol, montrant le métamorphisme produit dans le calcaire du muschelkalk t_2, par la roche éruptive dite tonalite d. t'_2, couches en grande partie changées en marbre. t''_2 calcaire également changé en marbre et imprégné de silicates. D'après M. Lepsius.

une étendue très considérable et les conglomérats rhyolitiques forment des montagnes, qui comptent parmi les plus hautes de la contrée. L'état normal de ces dépôts a parfois subi des modifications importantes. L'acide silicique en a été l'agent le plus puissant. Sa dissolution a pénétré dans les cavités des conglomérats et il s'est produit des roches qui ont résisté plus tard à l'action érosive des eaux, de sorte qu'elles se sont conservées sous forme de montagnes élevées. Celles des Kiralyhegy, de Mad et de Megyer à S. Patak

[1] *Association française*. Alger, 1881, p. 559.

où on l'exploite comme pierre à meules, en fournissent l'exemple (voir plus haut fig. 78).

Le sable qui se déposait dans la mer miocène autour de la formation trachytique a été aussi imprégné par la silice : il s'est ainsi transformé en un grès dans lequel on trouve des arbres entiers opalisés (Megyaszo).

La contrée de Tockay-Eperjes est particulièrement remarquable par la grande quantité d'acide silicique hydraté qui s'y est déposée tantôt à l'état d'opale et quelquefois exploitée comme pierre fine d'une remarquable beauté, tantôt à celui de ménilite et de tripoli. Quant aux opales communes, ordinairement brunes et jaunes, qui forment des étendues considérables, elles sont souvent stratifiées si parfaitement que des échantillons de collection rappellent les zones du bois pétrifié.

Quoique l'intervention de l'eau soit moins évidente dans les remarquables effets du métamorphisme opéré dans le voisinage du granite, elle y est très probable.

Tous les terrains stratifiés fossilifères reposent sur une assise cristallisée de nature granitique, consistant principalement en gneiss. Cependant on reconnaît qu'en bien des lieux, des masses granitiques se sont intercalées avec un caractère éruptif au milieu de roches stratifiées.

Ces éruptions de granite ont surtout eu lieu dans les périodes les plus anciennes, à travers les roches siluriennes, dévoniennes et carbonifères. Il y a poussé des apophyses variées, en développant dans son voisinage des auréoles concentriques métamorphisées.

Tel est le cas dans beaucoup de points de la Bretagne. Dans cette presqu'île, comme dans beaucoup d'autres pays, le granite paraît avoir été poussé à l'état pâteux au milieu des roches encaissantes.

C'est ce qu'attestent clairement les ramifications que

l'on peut constater çà et là sur la périphérie de chaque mamelon granitique.

A proximité de ces protubérances granitiques, les roches diverses et particulièrement les phyllades ont subi des transformations minéralogiques plus ou moins avancées et sur des distances variables, qui excèdent souvent plusieurs centaines de mètres. Déjà il y a un demi-siècle, un éminent géologue, de Boblaye, signalait un fait des plus remarquables : la présence d'orthis, de spirifères et de calymènes au milieu de roches schisteuses contenant en même temps des mâcles de plusieurs centimètres de longueur. Des faits du même genre ont été récemment étudiés d'une manière très précise par M. Barrois autour du massif granitique de Rostrenen[1].

La formation de la variété d'andalousite, connue sous le nom de mâcle ou de chiastolite, présente des circonstances très significatives pour remonter à la cause du métamorphisme.

C'est un silicate d'alumine, cristallisé en prismes droits qui atteignent souvent quelques centimètres de longueur et qui coupent nettement les feuillets du schiste.

Lorsqu'on en examine la cassure, on voit très souvent qu'au lieu d'être monochrôme, elle présente deux teintes, parfaitement distinctes et qui tranchent l'une sur l'autre : le blanc et le noir. Il en résulte des dessins variés : tantôt une croix noire formée par les deux diagonales du rectangle sur un fond blanc, tantôt sur le même fond blanc et au centre du rectangle, un plus petit rectangle noir.

L'origine de ces dispositions et d'autres qu'il serait trop long de rappeler, s'explique facilement. Le phyllade qui sert de matrice à ces cristaux est lui-même un silicate alu-

[1] *Bulletin de la Société géologique du Nord*, t. XII, p. 1, 1884.

mineux, mais impur et rendu en général noirâtre par une certaine quantité de matières charbonneuses. Un mouvement moléculaire s'est produit dans ce phyllade. Les cristaux ainsi séparés de la pâte, se sont nécessairement épurés, comme il arrive en général dans la cristallisation; de là la couleur blanche d'une partie de ces cristaux. Mais la matière obéissant à la force de cristallisation n'a pu se réunir, sans entraîner avec elle des impuretés, qui ne sont autres que les parties noires disposées symétriquement dans le cristal. C'est ce qui arrive dans certaines cristallisations artificielles.

Un même cristal cassé sur plusieurs points de sa longueur, ou bien coupé suivant son axe montre clairement, par la manière dont la substance blanche a emprisonné les parties noires, que ces dernières sont réellement accidentelles, et de plus, que ces cristaux n'existaient certainement pas originairement dans le phyllade. Ils sont postérieurs non seulement à cette roche, mais aussi au développement de son feuilleté.

Cette production de mâcles dans les phyllades ne s'y est pas faite fortuitement; elle est, en général, en rapport avec les contours des épanchements de granite.

Un autre silicate, la staurotide, s'est produit dans les mêmes conditions.

Les groupements en forme de croix que ces cristaux présentent fréquemment les ont fait remarquer depuis longtemps et connaître sous le nom de *croisettes*: c'est ainsi qu'ils figurent depuis des siècles dans les armoiries des Rohan.

Le mica s'est bien plus souvent produit encore que la mâcle et la staurotide dans les phyllades, à proximité des masses granitiques qui les traversent. En approchant du granite, le schiste devient souvent de plus en plus micacé.

Des faits semblables ont été constatés dans beaucoup

d'autres lieux et, par exemple, dans les Vosges septentrionales autour du massif du Champ-de-Feu.

Au petit Donon de Rothau, il se présente, en outre, un fait des plus caractéristiques[1]. Non loin du granite, le terrain de transition est traversé par une roche amphibolique. Dans les parties où sont accumulées des flustres et des *calamopora spongites* avec des noyaux de calcaire lamellaire, il apparaît de l'épidote, de l'amphibole et du quartz à l'état cristallisé. Des cavités voisines de formes indéterminées, mais que leur ressemblance avec les premières doit faire considérer aussi comme des empreintes madréporiques, sont tapissées de cristaux brillants des mêmes substances. C'est dans l'une de ces géodes que j'ai reconnu l'axinite, avec ses faces nommées *l* et *s* par Haüy. On peut croire que l'acide borique a été introduit à la suite de l'éruption rocheuse, comme dans les amas métallifères du Sud-Ouest de la Norwège, où l'on a trouvé l'axinite[2].

Le granite, dont l'intrusion a contribué pour une large part à la constitution de la chaîne des Pyrénées, y a produit les mêmes phénomènes qu'a décrits Durocher et que M. Barrois a également reconnus dans les Asturies et la Galice, où la tourmaline est associée aux schistes mâclifères.

En Cornouailles, chaque îlot granitique est également entouré d'auréoles métamorphiques. De la Bèche les a parfaitement fait connaître dans son classique ouvrage sur cette presqu'île, et les a figurées d'une manière expressive sur sa carte, par une teinte dégradée autour de chaque protubérance. La tourmaline[3] figure parmi les minéraux qui ont été ainsi engendrés.

Des exemples non moins nets sont visibles dans le

[1] *Comptes Rendus*, t. XVIII, p. 870, 1844.
[2] *Annales des Mines*, 4e série, t. III.
[3] Allport. *Quarterly Journal*, 1870.

district des lacs du nord de l'Angleterre, autour du granite de Skiddaw. L'altération s'étend jusqu'à 3 à 4 kilomètres de la masse éruptive et plus près, se montrent des cristaux de chiastolite sur une largeur excédant rarement 400 mètres[1].

Le sud-ouest de l'Irlande, dans le comté de Wicklow, présente des effets très caractérisés de métamorphisme autour de masses granitiques, qui se développent du nord-est au sud-ouest sur une longueur de 100 kilomètres avec une largeur de 8 à 11 kilomètres.

Au Harz les roches enveloppant le granite, qui ont depuis longtemps reçu le nom de *hornfels*, décèlent des actions non moins significatives.

En Bavière, dans le Fichtelgebirge, aux États-Unis, dans le New-Hampshire[2] et dans bien d'autres lieux, il serait facile de signaler des faits analogues.

Les transformations dues aux intercalations de granite se sont propagées sur des distances variables qui, de quelques centaines de mètres, vont exceptionnellement à 1500, 2000 et 3000 mètres. Elles se sont généralement propagées plus loin dans les angles rentrants de la masse éruptive.

La chaleur seule ne peut expliquer ces faits, ainsi que Durocher l'avait reconnu. Le granite qui a pénétré à un état plastique nous apprend, par les inclusions que renferme encore sa pâte, que des gaz, des vapeurs, des liquides parmi lesquels l'eau se trouvait très probablement, ont dû accompagner sa sortie et contribué aux actions que nous venons de signaler.

[1] Ward. *Quarterly Journal*, t. XXXII, 1876.
[2] Hawes. *American journal*, 1881, t. XXI, p. 21.

CHAPITRE II

MÉTAMORPHISME RÉGIONAL

Métamorphisme de composition minéralogique.

Ce n'est pas seulement à proximité des roches éruptives que les roches stratifiées ont subi des modifications très notables.

Comme premières phases de ces modifications, nous en avons signalé plus haut qui se sont produites, sans qu'il y ait eu formation de nouvelles espèces minérales, comme étant le résultat d'un simple départ accompagné d'une cristallisation. Telles sont les veines calcaires des marbres et les veines quartzeuses des quartzites et des phyllades.

Mais il est aussi des changements plus avancés.

Des massifs considérables de roches sédimentaires, occupant des pays entiers, montrent un métamorphisme prononcé, lors même qu'il est impossible de découvrir au milieu de ces terrains le moindre affleurement de roches éruptives.

Cette modification est facile à constater dans les contrées où elle est assez peu intense pour n'avoir pas fait dispa-

raître le caractère sédimentaire de la roche, comme il arrive dans le pays de Galles, le Taunus et les Ardennes.

Dans ces contrées et d'autres de l'Europe occidentale sur lesquelles les études géologiques se sont portées d'abord, ce sont les terrains les plus anciens qui présentent des caractères cristallins de ce genre ; aussi a-t-on cru pendant longtemps que cet état minéralogique était l'apanage des dépôts sédimentaires formés à ces époques reculées. De là le nom de terrains de *transition* que leur avait donné Werner, supposant que dans la mer où ces roches s'étaient formées, à la suite des terrains primitifs ou cristallins, il continuait à s'opérer une précipitation chimique de silicates, en même temps que commençaient à s'y former des dépôts mécaniques.

Plus tard, on a reconnu qu'il n'en est pas ainsi et que cet état semi-cristallin résulte certainement d'une transformation postérieure à la sédimentation.

Sans insister ici sur la nature des divers changements qui se sont produits dans ces terrains, je me bornerai à remarquer qu'aux roches argileuses se sont substitués des phyllades. Ces roches, bien que consistant essentiellement comme les premières, en silicates d'alumine, en diffèrent tout d'abord par leur cohésion ; elles se refusent à se délayer dans l'eau, ainsi que chacun peut le constater sur les variétés employées sous le nom d'ardoises, pour couvrir les habitations.

Des combinaisons cristallisées diverses y ont en effet pris naissance ; Sauvage l'avait déjà clairement reconnu, il y a plus de quarante ans, à la suite de ses importantes recherches chimiques sur les phyllades des Ardennes[1]. C'est ce que l'examen microscopique a bien démontré à MM. Re-

[1] *Annales des Mines*, 4e série, t. VII, p. 411, 1845.

nard[1], Mallard, Barrois et d'autres lithologistes. On y discerne de nombreuses espèces minérales, principalement la séricite, la chloritoïde ou chlorite et le quartz ; en outre, de l'ottrélite, de la staurotide, de la tourmaline, du zircon, du grenat, de la pyrophyllite, de la magnétite, de l'oligiste, de l'ilménite, du rutile, de la pyrite et de la pyrrhotine.

Ce qui confirme pleinement la supposition que l'état minéralogique de ces terrains n'est pas une conséquence nécessaire de leur ancienneté, c'est que des couches qui en sont contemporaines, c'est-à-dire appartenant aussi aux systèmes les plus anciens, ne participent pas à ces caractères cristallins. Il en est ainsi pour les couches siluriennes dans le nord de l'Europe, en Suède et en Russie, ainsi que dans l'Amérique du Nord, aux États-Unis et au Canada. Dans ces contrées se présentent des couches argileuses, non moins que dans les terrains plus récents.

Ces contrastes minéralogiques dans les terrains anciens de ces divers pays sont en rapport avec des différences notables de gisement. Au lieu d'être fortement disloquée, comme dans les premières contrées qui ont été mentionnées, la stratification dans ces dernières a conservé son horizontalité première. C'est un fait important qui s'expliquera plus loin.

D'autre part, il existe des pays entiers où des massifs considérables de terrains moins anciens ont subi des transformations profondes.

Les Alpes, qui seront à jamais une région classique pour la géologie, tant à cause des actions dynamiques qui ont donné naissance à cette chaîne, que par les profondes et imposantes déchirures dans lesquelles elle expose sa con-

[1] *Bull. du Muséum d'Hist. nat. de Belgique*, t. I, 1882 et t. II, 1883, et *Bull. Soc. géolog.*, 3e série, t. XI, p. 638, 1882.

stitution interne, fournissent des observations fondamentales pour la théorie du métamorphisme.

Ainsi que l'a reconnu Brochant dès 1808, on y observe fréquemment des passages graduels des roches sédimentaires à des roches cristallines, qui parfois renferment des vestiges de fossiles secondaires. Lorsqu'on arrive dans cette chaîne et qu'on se trouve en présence des roches des diverses périodes qui entrent dans sa constitution, carbonifères, triasiques, jurassiques et tertiaires, on est surpris de la physionomie générale que présentent ces roches, comparées aux masses lithologiques du même âge du centre de la France et des pays où elles sont restées horizontales.

Le terrain carbonifère renferme des couches qu'on pourrait parfois confondre avec des micaschites ou des gneiss. Des quartzites qu'on est fondé à attribuer au trias y remplacent les grès : le calcaire et la dolomite du même groupe sont fréquemment parsemés de cristaux, parfois assez volumineux et parfaitement nets, de feldspath albite, par exemple au Bourget près Modane.

Une influence générale a donc agi sur un grand espace et a affecté les roches de tous les âges, y compris l'étage inférieur des terrains tertiaires, c'est-à-dire une série de couches épaisses de plusieurs milliers de mètres, quoique les roches éruptives soient très rares dans ce massif.

Ici encore, il importe de le remarquer, comme pour les terrains plus anciens, ces transformations sont en rapport avec des dislocations.

Dans les diverses contrées où les masses pierreuses ont été transformées, les combustibles charbonneux, dont la nature n'est pas moins impressionable, ont été eux-mêmes modifiés. Ils sont représentés par de l'anthracite, non-seulement dans la Basse-Loire et la Sarthe, mais aussi dans les Alpes du Dauphiné et de la Maurienne. Il en a été de même

dans d'autres cas, sans que les roches associées aient été sensiblement modifiées. C'est ainsi que dans le nord de la France, la nature du charbon éprouve une modification continue, à mesure qu'on descend des couches supérieures aux couches profondes ; la proportion de carbone fixe qu'ils contiennent augmente de 58 à 90 pour 100. Le bassin de Mons et celui de Liège présentent des faits semblables. Au Creusot, la couche qui est grasse à l'affleurement, devient anthraciteuse en profondeur. Dans le sud du Pays de Galles, tandis que la partie orientale du bassin fournit d'excellent charbon bitumineux, par exemple aux environs d'Aberdare, c'est de l'anthracite qu'il contient dans sa région occidentale; dans les parties intermédiaires, il y a transition de l'un à l'autre type. Des variations du même genre ont été signalées depuis longtemps, en Pensylvanie, ainsi que les particularités de leur gisement, par les frères Rogers.

Métamorphisme de texture : schistosité, feuilleté, fissillité des roches.

Aux modifications minéralogiques caractérisées du métamorphisme dont nous venons de donner une idée, est associée une modification de texture qui, nous allons le voir, s'y rattache en général d'une manière intime.

Des roches, minéralogiquement très diverses, et fort différentes aussi par leur mode de formation originelle, se présentent avec la texture désignée sous le nom de *schisteuse*. Cette texture, bien connue dans les ardoises, affecte beaucoup de roches stratifiées fossilifères, particulièrement les plus anciennes. Elle est aussi très développée dans le gneiss et dans la plus grande partie des masses cristallines qui servent de fondement à la série des terrains sédimentaires.

Enfin certaines masses, évidemment éruptives, en offrent des exemples. Le développement considérable des masses schisteuses dans l'écorce terrestre n'est pas moins digne d'attention que leur diversité. Il importe donc de rechercher les causes qui ont déterminé cette disposition dans les particules des roches.

La *schistosité* ou *fissilité* a été souvent désignée sous le nom de *clivage*, particulièrement dans les roches stratifiées. Au clivage se rattache, dans les roches cristallisées, un caractère analogue, que l'on a cru devoir désigner sous un nom particulier, celui de *foliation* ou de *lamination*. Les gneiss et les leptynites en offrent les exemples les plus connus.

Avant de présenter les résultats d'expériences, qui ont eu pour but d'éclairer et de préciser les conditions dans lesquelles cette texture a pris naissance, il convient de rappeler succinctement les faits caractéristiques, auxquels l'observation a conduit sur ce sujet, faits qui ont servi d'objectif aux expériences.

Faits acquis par l'observation relativement à la schistosité. — Le nom de clivage, qui est emprunté à la cristallographie, représente, en effet, dans les roches, un caractère assez analogue à ceux que possèdent les cristaux. On sait qu'un rhomboèdre de spath d'Islande, parfaitement transparent, n'ayant aucune fissure perceptible à l'œil, se brise très facilement suivant une série de plans parallèles à ses faces. Cette propriété remarquable est en rapport, comme le démontrent les caractères optiques, avec les différences que présentent le groupement moléculaire, suivant les direc-

[1] Déjà Vallérius dans sa classification, avait fait le groupe des *fissilia;* de Saussure employait le nom expressif de *roches feuilletées.*

tions que l'on considère. De même, le bloc de roche dont on doit extraire des ardoises ne possède pas, en général, de fissures préexistantes et visibles, comme celles qui séparent les couches des terrains stratifiés ou des prismes de basalte contigus : on ne peut les distinguer même sur des tranches polies. Mais, soumis à un choc, l'échantillon se brise en feuillets minces, suivant une certaine direction, à laquelle correspond un *minimum de cohésion*, Ainsi, comme les plans de clivage des cristaux, les plans de clivage des roches ne sont pas toujours, dès l'abord, apparents et sensibles ; ils sont souvent latents ou virtuels.

Toutefois, cette ressemblance du clivage, dans les roches

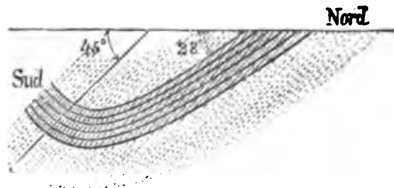


Fig. 80. — Coupe transversale, du nord au sud, de la bande ardoisière de Fumay (Ardennes), relevée d'après les travaux souterrains. Elle montre l'indépendance du feuilleté, par rapport à la stratification et la constance de sa direction, en présence d'inflexions diverses. La stratification est ainsi décelée avec certitude par la présence de bancs puissants de quartz, entre lesquels la couche de phyllade est enclavée et dans lesquels le feuilleté se poursuit avec moins de netteté. — Echelle de $\frac{1}{2400}$. — D'après M. Nivoit.

et dans les minéraux, n'empêche pas d'établir une distinction importante. Tandis que, dans un cristal, le clivage est invariablement en rapport géométrique avec les faces, le clivage des roches se poursuit, tantôt en traversant des associations d'innombrables cristaux, visibles ou microscopiques, tantôt des masses d'apparence amorphe.

Des observations faites dans des contrées très diverses ont démontré ce fait important que les plans de clivage sont bien distincts des plans de stratification qui divisent les mêmes massifs de roches. En effet, au lieu de leur être parallèles, ils leur sont fréquemment obliques (fig. 80 et 81).

Ce qui est encore plus concluant, c'est que, dans les cas nombreux où les couches ont été ployées et présentent des inclinaisons variées, les plans de clivage se poursuivent, avec régularité, au milieu des inflexions les plus prononcées des couches auxquelles ils appartiennent, en restant toujours parallèles entre eux. C'est, par exemple, ce que l'on observe dans les ardoisières de Fumay (Ardennes), où la stratification est accusée par des alternances réitérées de quartzites verdâtres avec le schiste ardoisier violet[1], et qui a subi les inflexions les plus diverses (fig. 80, 81, 82, 83 et 84).

Cette indépendance montre, en outre, que les plans de

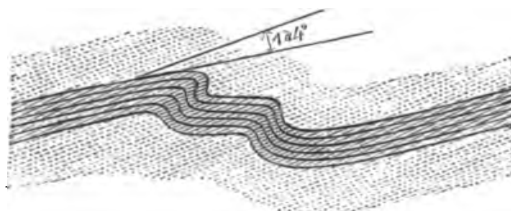


Fig. 81. — Plan souterrain de la bande ardoisière de Fumay, complétant la démonstration déjà fournie par la coupe verticale précédente. — Même échelle. — D'après M. Nivoit.

clivage se sont produits, non-seulement après que les couches, où ils se manifestent, s'étaient déposées, mais encore lorsque ces couches avaient déjà perdu leur horizontalité première, sous de puissantes étreintes,

Toutefois, dans bien des cas, les plans de clivage se sont produits parallèlement à la stratification[2]. Cette concordance

[1] Sauvage et Buvignier, *Statistique minéralogique et géologique du département des Ardennes*, p. 125.

Ce fait, qui avait déjà été signalé autrefois par divers observateurs, Voigt, Von Hof, Schmidt, Bakewell, Parrot (1826), a été bien démontré par Sedgwick dans le Pays de Galles, pour un district de 45 kilomètres de longueur sur 12 à 15 kilomètres de largeur, où les couches sont très ployées (Remarks on the structure of large mineral masses, and especially on the chemical changes produced in the aggregation of stratified rocks during different periods after their deposition. *Transactions of the geological Society of London*, 2e sér., t. III, p. 461 ; 1835).

[2] Ce parallélisme fréquent a été remarqué au Hartz, en Saxe, en Bretagne, en Écosse,

ne prouve aucunement contre la différence d'origine qui

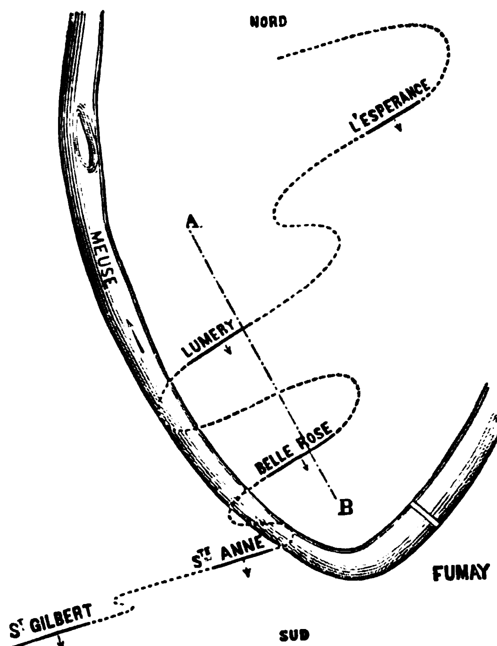


Fig. 82. — Plan souterrain, relevé d'après les travaux de mines, montrant combien les inflexions des couches du terrain ardoisier sont brusques et multipliées, aux environs de Fumay (Ardennes); on le reconnait dans les ardoisières de l'Espérance, Lumery, Belle-Rose, Sainte-Anne et Saint-Gilbert. — Echelle de $\frac{1}{20000}$. — D'après M. Nivoit.

vient d'être signalée entre l'un et l'autre mode de division.

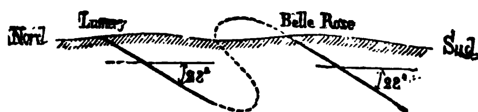


Fig. 83. — Coupe verticale, suivant AB de la figure précédente, et servant à la compléter, en montrant que les inflexions des terrains à ardoise des environs de Fumay ne sont pas moins brusques dans le sens vertical que dans le sens horizontal. — Échelle de $\frac{1}{20000}$. — D'après M. Nivoit.

Comme cas particulier, quoique assez fréquent, l'angle du plan de clivage avec la stratification, prenant des inclinai-

en Devonshire et dans le système du Rhin, par Haussmann, Naumann, Durocher, Macculloch, De la Bèche, Baur et de Dechen.

sons diverses, peut se réduire graduellement à zéro. La figure 84 présente une disposition des ardoisières de Pierka, près Rimogne, où l'inclinaison, avant d'arriver à cette limite, est réduite à 3 degrés seulement.

Enfin on peut remarquer que, même dans les régions schisteuses, les phyllades ne possèdent qu'exceptionnellement une fissilité assez grande pour pouvoir être débités en ardoises. Ainsi, dans les Ardennes, aux environs de Fumay,

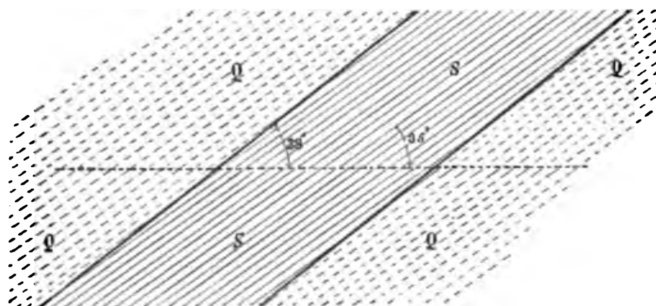


Fig. 84. — Indépendance du feuilleté par rapport à la stratification. Malgré l'apparence de parallélisme, l'angle des feuillets avec les couches est de 3 degrés dans la partie représentée qui appartient à l'ardoisière de Pierka à Rimogne (Ardennes). — SS, Couche d'ardoise; QQ, couches de quartzite entre lesquelles est intercalée l'ardoise. Le feuilleté est représenté par des hachures, pleines dans le schiste, ponctuées dans le quartzite, et qui ne sont pas tout à fait parallèles aux plans de jonction des couches. — Echelle de $\frac{1}{120}$. — D'après M. Lahoussaye.

de Deville, de Rimogne, les zones susceptibles d'être exploitées comme telles n'ont que des dimensions très limitées.

Quand le feuilleté passe d'une roche dans une roche d'espèce différente, il persiste souvent dans sa situation, mais en présentant une différence d'intensité, et quelquefois en subissant, sur la limite, des inflexions dont la Bèche a montré divers exemples[1].

Ce qui vient d'être signalé, comme l'un des caractères essentiels de la schistosité dans les terrains les plus anciens, se reproduit dans les couches relativement récentes, à la

[1] *The geological Observer*, p. 706; *Report on the geology of Cornwall*, p. 275.

condition toutefois que celles-ci aient également éprouvé des actions mécaniques et des inflexions.

L'exemple représenté par les figures 85 et 86 a été choisi

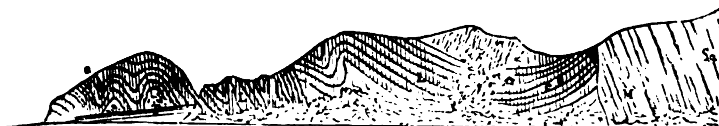


Fig. 85. — Profil de la rive gauche de la vallée de la Romanche, en aval du bourg d'Oisans, d'après M. Lory, montrant l'indépendance du clivage ardoisier par rapport à la stratification, qui est extrêmement contournée et passe par toutes les inclinaisons possibles. — L, schistes argilo-calcaires du lias exploités à la Paute *a*; M, micaschiste; S, schiste amphibolique. — Échelle de $\frac{1}{1800}$.

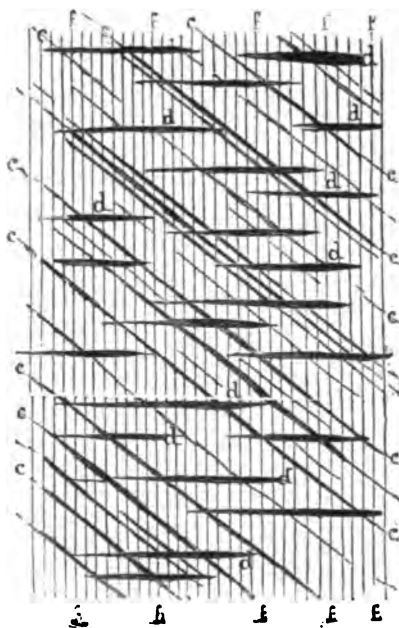


Fig. 86. — Détail de l'ardoisière de la Paute (*a* de la figure précédente) montrant comment des systèmes de joints très-nombreux (*d*) indépendants de la stratification (*c*) sont perpendiculaires aux directions des feuillets *f*, *f*. — Échelle de $\frac{1}{20}$.

dans les Alpes du Dauphiné et pour les roches appartenant au lias.

Un caractère analogue, qui, dans les roches cristallines, a reçu le nom de foliation ou de lamination est déterminé

par la disposition parallèle qu'y affectent les faces homologues des minéraux cristallisés constitutifs. Le parallélisme est particulièrement frappant pour le mica, la chlorite, le talc et les autres minéraux en lamelles; mais il se manifeste aussi pour des minéraux tabulaires, comme l'orthose et l'oligoclase. Les substances métalliques, telles que l'oligiste, y prennent également part, notamment dans l'itabirite.

Parmi les observations dont la foliation a été l'objet, il faut particulièrement signaler celles de Poulett Scrope et de Daniel Sharpe[1].

Nous réunirons ici les deux termes de clivage et de foliation sous le nom unique de *schistosité*

En passant en revue les principales roches où l'on observe la schistosité on reconnaît combien ces roches sont minéralogiquement variées.

Parmi les roches stratifiées, les schistes argileux ou phyllades, et les nombreuses variétés qui s'y rattachent (schistes à séricite, etc.), sont celles où la structure feuilletée est particulièrement caractérisée. Cette structure, très fréquente dans les roches fossilifères les plus anciennes, siluriennes et dévoniennes, persiste parfois dans des terrains beaucoup plus récents, lorsque ces terrains ont été soumis à des dislocations. En maintes localités des Alpes, des ardoises sont exploitées dans le terrain carbonifère, ainsi que dans le trias de la Maurienne et de la Tarentaise (schiste lustré). Des couches jurassiques fournissent des ardoises sur beaucoup de points, notamment dans la plupart des communes de l'Oisans, du Valbonnais et du Valgaudemar[2]. C'est à ce même terrain qu'appartiennent les ardoises

[1] Poulett Scrope a supposé, depuis longtemps, que la foliation, comme le clivage des schistes à grain fin, est due au glissement de leurs parties cristallines ou semi-cristallines, lorsqu'elles étaient à l'état visqueux (*Considerations on volcanoes*; 1825).

[2] Lory, *Descr. géol. Dauphiné*, p. 99.

de Cevins, les plus renommées de la Savoie[1], celle de Petit-Cœur (Tarentaise), de plusieurs parties de l'Ariège[2], et de Marienthal en Hongrie, qui se débitent en feuilles très minces. Le terrain crétacé fournit des schistes ardoisiers dans les Pyrénées, au Caucase, au Venezuela et à la Terre de Feu. Enfin des ardoises de qualité supérieure à celles du lias sont exploitées dans le terrain nummulitique, par exemple, en Suisse, au Plattenberg près de Glaris; en Dauphiné, dans le Vallouise; en Maurienne, à Montricher et à Saint-Julien[3]; dans les Basses-Alpes, près de Barcelonnette.

Ces mêmes terrains à phyllades renferment quelquefois des calcaires où la texture schisteuse est très marquée, surtout lorsque ces calcaires sont impurs. Des calcaires phylladifères (calcschistes) et arénifères, très developpés dans la Maurienne et la Tarentaise, et attribués au terrain triasique, en offrent des exemples. Le terrain jurassique des Pyrénées en présente aussi[4]. Des calcaires feuilletés, tels que les cipolins, sont fréquents dans les terrains cristallisés.

C'est dans des conditions semblables de gisement que se trouvent des quartzites schisteux. Leur feuilleté correspond à la présence, tantôt du mica, tantôt du talc, tantôt de la chlorite (itacolumite), tantôt de l'oligiste (itabirite). D'autres minéraux, tels que le disthène et le graphite peuvent être également interposés entre les feuillets[5].

On sait combien la schistosité est remarquable dans le

[1] Favre, *op. cit.*, t. III, p. 186.
[2] Mussy. *Carte géologique et minéralogique du dép. de l'Ariège, Texte explicatif*, p. 261.
[3] Lory, *op. cit.*, p. 186 et 544.
[4] Leymerie, *Esquisse géognostique des Pyrénées de la Haute-Garonne*, p. 51.
[5] Exemples : quartzites subordonnés au gneiss aux environs de Freyberg (collection du Muséum), aux phyllades de la Belgique (d'après Dumont); quartzites feuilletés de la Norvège (Durocher, *Études sur la structure orographique et la constitution géologique de la Norvège de la Suède et de la Finlande*, p. 63).

gneiss, qui occupe une si large place, avec le granite, dans l'assise cristallisée. Cette roche est susceptible de se débiter en dalles minces, comme la variété très micacée des environs de Chiavenna, qui sert à couvrir les habitations. Les micaschistes, talcschistes et chloritoschistes sont bien connus pour leur structure essentiellement feuilletée.

Dans la roche granitoïde, à laquelle on a donné le nom de leptynite, la structure schisteuse est d'autant plus digne d'attention que le mica y est ordinairement peu abondant. Le quartz y forme d'innombrables feuillets, parfois très minces, qui traversent la masse feldspathique cristalline, et de nombreux cristaux de grenat sont souvent disposés parallèlement à ces plaques[1].

Des transitions insensibles unissent, dans beaucoup de lieux, le granite au gneiss et au leptynite, c'est-à-dire que le granite devient graduellement feuilleté. Il n'est, pour ainsi dire, pas de contrée granitique qui n'offre des exemples de tels passages. Lors même que rien dans l'aspect du granite n'accuse cette structure, les ouvriers qui ont à le tailler savent y reconnaître certaines directions, suivant lesquelles la roche se fend plus facilement que dans d'autres : ils y distinguent un *grain* ou un *fil*, dont ils tirent parti dans leur travail.

La protogine offre aussi la liaison la plus intime avec les roches feuilletées, ainsi que le signalent toutes les descriptions du massif du Mont-Blanc, données depuis de Saussure.

Dans les syénites, les cristaux de feldspath sont souvent disposés parallèlement les uns aux autres, par leurs faces homologues, comme dans les Ballons des Vosges et surtout aux environs de Dresde et de Meissen en Saxe[2].

[1] Exemple, le leptynite de Penig près Dresde.

[2] Dans les grandes carrières exploitées près Plauen, à 50 kilomètres de Dresde, cet alignement est très net.

De même, la roche à néphéline ou miascite de l'Ilmen devient graduellement schistoïde.

Comme le mica, l'amphibole, par sa forme en prismes allongés, a coopéré efficacement à donner une structure schistoïde aux roches dont ce minéral fait partie constituante, particulièrement aux amphibolithes et aux diorites[1].

La structure schisteuse est souvent très prononcée dans les roches éruptives, où la stratification proprement dite n'a pas eu de part, bien que, d'ailleurs, les minéraux en paillettes, comme le mica, si propres à produire cette structure, y fassent ordinairement défaut. On peut dire qu'elle peut se rencontrer dans toutes les espèces de roches éruptives.

En beaucoup de localités, le porphyre feldspathique montre, d'une manière frappante, la structure dont il s'agit; la disposition veinée ne résulte pas seulement des différences de coloration; le quartz y est souvent séparé, de même que dans le leptynite, sous la forme de feuilles parallèles, de manière à mériter à ce porphyre le nom allemand de *Papierporphyr*, qui lui a été donné autrefois. Cette propriété a été parfaitement décrite dans le porphyre de Dobritz, près Meissen, en Saxe[2], où le quartz est non-seulement en gros grains isolés, mais aussi en forme de lames, avec des sphérolithes. On peut citer aussi ceux d'Asbach et d'autres localités du Thüringerwald[3], et de la contrée de la Lenne, où, d'après M. von Dechen, il y a parfois un passage complet du porphyre au phyllade[4]. Les eurites connues en Suède, sous le nom de

[1] Comme exemple pris dans la collection du Museum, on peut citer les amphibolites schistoides de Labassère (Hautes-Pyrénées), du Saint-Gothard, des environs de Hammerfest, de Ceylan, et le diorite schistoïde de la vallée de Héas (Hautes-Pyrénées).

[2] Naumann, *Lehrbuch der Geognosie*, t. I, p. 617.

[3] Credner, *Thüringerwald*, p. 63.

[4] *Geogdostische Uebersicht des Arnsberg*, p. 75.

Hælleflinta, si souvent rubanées, appartiennent à la même catégorie.

Dans le mélaphyre, comme de Buch l'a reconnu pour celui du Tyrol, les cristaux d'oligoclase sont souvent à peu près alignés[1]. Je ne ferai que mentionner, au même point de vue, la diabase, le gabbro, l'éclogite, l'hypersthénite, la serpentine[2], l'anamésite et la minette (par exemple, celle des Vosges)[3].

La texture feuilletée a été, depuis longtemps, observée dans les divers types de roches trachytiques, qui sont devenus schistoïdes, rubanés ou tégulaires, par le parallélisme des tables de sanidine. Aux environs du Puy-en-Velay, le trachyte se divise en tables et en dalles que l'on y exploite[4]. Parmi les exemples que l'on pourrait citer, je me bornerai à rappeler ceux des Iles Ponces, sur lesquels Poulett Scrope a appelé l'attention[5], et celui du Drachenfels, près de Bonn[6].

On sait d'ailleurs que les roches trachytiques produites actuellement par les volcans, sous forme de coulées de laves, prennent également la structure schisteuse. A Santorin, d'après M. Fouqué, qui a fait une étude classique de cette île remarquable, il est des laves qui peuvent servir comme dalles, à la manière des micaschistes. Des laves feuilletées, doléritiques et feldspathiques, ont été recueillies par M. Vélain aux îles Saint-Paul et Amsterdam, et par M. Filhol, à l'île Campbell, ainsi qu'il ressort des collections déposées au

[1] Von Richthofen, *Bemerkungen über die Trennung von Melaphyr und Augit-Porphyr*, p. 35.

[2] La serpentide et l'euphotide dans les Grisons, d'après M. Studer.

[3] Delesse, Mémoires sur les Roches des Vosges : minette (*Annales des Mines*, 5e sér., t. X, p. 517), p. 541, 1856), — Daubrée, *Descr. géol. et min. du dép. du Bas-Rhin*, p. 35.

[4] Bertrand-Roux, *Description géognostique des environs du Puy-en-Velay*, p. 114-119.

[5] *Trans. Geol. Soc.*, t. II, p. 195.

[6] Von Rath, *Das Siebengebirge*. Les cristaux sont brisés, ce qui prouve qu'ils étaient formés quand la roche elle-même jouissait encore d'une certaine plasticité.

Muséum par ces savants. Comme on l'a remarqué depuis longtemps, les cavités vides ou remplies qui se rencontrent dans ces roches sont alignées parallèlement aux feuillets.

Je rappellerai enfin que la structure schistoïde est souvent caractérisée dans le phonolithe (Haute-Loire, Puy-de-Dôme, Islande).

Lors même que le type de texture qui nous occupe n'est pas reconnaissable à l'œil nu, il est très souvent discernable au microscope. La texture fluidale, dont le rhyolithe et d'autres variétés de trachyte offrent le type, se montre dans beaucoup de roches cristallines anciennes, ainsi que l'ont fait voir les études de M. Michel-Lévy relatives à ces dernières[1].

D'un autre côté, l'étendue des masses feuilletées dans l'écorce terrestre n'est pas moins digne d'attention que la diversité des roches dans lesquelles se présente le caractère de schistosité. Toutes les parties du globe offrent des exemples de leur grand développement. On peut citer à ce titre la France centrale, l'Écosse, la Moravie, la Suède, la Norvège, la Finlande, la partie septentrionale des États-Unis, le Canada, une portion considérable de l'Amérique du Sud, notamment le Brésil, certaines parties de la Nouvelle-Zélande, de l'Australie, etc. Partout les roches granitoïdes du groupe du gneiss paraissent former le soubassement des terrains stratifiés : ce que l'on en voit n'en représente donc qu'une faible partie.

C'est surtout quand on pénètre dans l'intérieur des chaînes de montagnes, où des épaisseurs considérables de roches sont souvent mises à nu par des déchirures et des

[1] On a vu précédemment qu'en examinant au microscope la texture des briques zéolithiques de Plombières, on y reconnaît une structure tout à fait analogue à celle des roches fluidales; la consistance plastique qui a donné naissance à cette texture peut donc avoir été produite dans des circonstances diverses.

escarpements naturels, qu'on est témoin de l'importance des roches schisteuses cristallines. Tel est le cas pour les nombreux massifs centraux des Alpes, dans l'Oisans, le Piémont, le Salzbourg, etc. Il en est de même des Alpes Scandinaves, de l'Oural et de bien d'autres chaînes appartenant à toutes les parties du globe.

En résumé, si l'on remarque combien les roches feuilletées abondent de toutes parts dans les terrains paléozoïques et surtout dans les roches cristallines, on peut dire que, dans la partie de l'écorce terrestre accessible à nos investigations, la texture schisteuse occupe un développement comparable à celui de la stratification, et qu'elle en forme un trait non moins remarquable.

Les déformations considérables et variées que présentent les trilobites, les brachiopodes et en général les fossiles renfermés dans les roches schisteuses, sont bien connues[1]. Depuis qu'il a été constaté que ces déformations ou distorsions sont en rapport avec la cause de la fissilité, elles peuvent guider dans la recherche des forces auxquelles les roches elles-mêmes ont été autrefois soumises.

Observées particulièrement dans les roches siluriennes[2] et dévoniennes[3], ces déformations de fossiles se rencontrent également dans les roches moins anciennes qui sont devenues schisteuses : ainsi, elles sont fréquentes dans les couches jurassiques des Alpes[4]. Comme exemples appartenant

[1] A la suite des études classiques de Sharpe sur ce sujet. je me fais un plaisir de mentionner ici les ingénieuses mesures de M. Dufet (*Annales de l'École normale supérieure;* 1875).

[2] On connaît les *Calymene* des ardoises siluriennes d'Angers, qui sont extrêmement déformées et d'une manière fort variée ; au contraire, comme l'a observé M. Dufet, des crustacés du même genre (*Calymene Tristani* et *C. Arago*) ont conservé leurs formes à La Hunaudière (Loire-Inférieure), lorsqu'ils étaient empâtés dans des rognons durs qui les ont préservés du laminage.

[3] Ardoisières dévoniennes de Tintagel (Devonshire).

[4] Lory, *Descr. géol. du Dauphiné*, p. 106.

au terrain crétacé, je citerai des ammonites des Corbières et notamment de l'étang de Leucate [1].

Un second type, non moins fréquent que les changements de courbure, est présenté par les bélemnites de diverses localités des Alpes, qui ont été tronçonnées et dont les segments se sont plus ou moins écartés. Ces faits ont été remarqués depuis bien longtemps, dans quelques parties du massif du Mont-Blanc, particulièrement au mont Joli, au mont Lachat (fig. 87) et dans la chaîne des Aiguilles-Rouges, dans



Fig. 87. — Bélemnite étirée et tronçonnée des couches jurassiques du mont Lachat (contrefort du Mont-Blanc). E, E, E, intervalles compris entre les tronçons et incrustés de calcite et de quartz. — Grandeur naturelle.

le Mayenthal, près Wasen (Uri) [2], ainsi que dans les Alpes bernoises, au Frête de Saille, dans les dolomies oxfordiennes [3].

Une bélemnite qui originairement avait 5 à 7 centimètres de longueur atteint jusqu'à 30 centimètres; les tronçons sont ordinairement disposés suivant une ligne droite. Des bélemnites étirées de la même manière se rencontrent aussi dans les schistes argilo-calcaires, exploités pour ardoises, dans l'Oisans, le Valbonnais, le Valgaudemar et autres localités des Alpes françaises [4].

[1] Collection de M. Adrien Paillette, déposée au Muséum, n°s 74 et 79.

[2] M. Pierre Mérian en a donné une très bonne description (*Berichte über die Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Basel*, t. VII, p. 55; 1845); — Studer, *Geologie der Schweiz*, t. I, p. 374. — Voir aussi : Alph. Favre, *Recherches géologiques sur les parties de la Savoie voisines du Mont-Blanc*, t. III, p. 165.

[3] D'après M. Renevier.

[4] D'après M. Lory.

Toutes ces déformations, tous ces brisements, ont amené à cette induction que la schistosité a été engendrée par des pressions mécaniques, aussi bien que les déformations et étirements de fossiles auxquels elle se rattache[1].

Les agents qui ont produit le feuilleté ont donné, en outre, naissance à d'autres caractères.

Tel est le *parallélisme linéaire* que l'on constate très fréquemment dans les gneiss, micaschistes, schistes amphiboliques, quartzites, itabirites, itacolumites, roches à graphite, etc.[2].

Le parallélisme linéaire très prononcé que présentent de grandes plaques de gneiss, de la collection du Muséum, offre une ressemblance frappante avec quelques-uns des produits d'expérience dont il va être question.

Dans des roches qui n'avaient pas les conditions de plasticité convenables pour acquérir la structure feuilletée, les pressions internes ont laissé parfois une empreinte de nature différente, mais non moins significative.

Telle est la structure entrelacée de beaucoup de calcaires avec veines argileuses. Certains marbres de Campan et des marbres griottes présentent aussi des indices évidents du même mode d'action. On peut en observer des exemples du même genre dans les Alpes, sur les calcaires phylladifères de la vallée de Tignes, en Tarentaise.

Je rappellerai également, comme autres indices d'étirement, ceux que j'ai observés dans les phyllades et les quartzites de la montagne du Roule, près Cherbourg[3] : ils consistent dans l'aplatissement des nodules de quartz et de

[1] Daniel Sharpe a bien démontré ce fait.

[2] Je ne puis que renvoyer aux excellentes observations que Naumann a faites sur ce sujet.

[3] Observations sur la nature des actions métamorphiques qu'ont subies les roches des environs de Cherbourg. *Mémoires de la Société des Sciences naturelles de Cherbourg*, t. VIII.

pegmatite dans le sens des feuillets et dans un étirement linéaire de beaucoup de géodes contenant du quartz, du feldspath et de la chlorite, qui ont pris des formes tubulées, de manière à rappeler les cellules étroites et parallèles de certains polypiers.

Les roches sont parfois non seulement feuilletées, mais aussi finement *plissées* et *fibreuses*. A côté du calcaire du Tyrol, qui a été bien souvent cité comme tel, je me bornerai à mentionner un phyllade subluisant, à pâte très fine, à feuillets constamment ridés, provenant de la vallée de Tignes, en Tarentaise, ainsi que beaucoup d'autres schistes analogues, de la même région [1]. Les calcschistes du terrain jurassique des Pyrénées sont souvent comme filandreux [2]. En Écosse, le calcaire, aussi bien que le phyllade, est quelquefois fibreux comme du bois [3].

Expériences faites pour expliquer la schistosité et les caractères qui s'y rattachent.—Depuis qu'il a été constaté que la schistosité est indépendante de la stratification, la cause d'une disposition géométrique aussi remarquable et aussi générale a été l'objet de diverses hypothèses. On l'a attribuée, tantôt à des actions cristallines, tantôt à des effets électriques. La seconde de ces suppositions s'appuyait surtout sur ce résultat, annoncé par Robert Fox [4], que l'argile humide, en présence de courants électriques, peut devenir schisteuse. Le magnétisme terrestre, la chaleur interne, un commencement de cristallisation, ont aussi été invoqués, comme causes de cette texture [5]. Ces origines, qu'on pourrait qualifier d'occultes,

[1] Le mot *Gefaltelte* a été employé pour désigner cette texture ou *fibrosité*, dont le talc laminaire présente des exemples en Tyrol, au Zillerthal et aux États-Unis.

[2] D'après M. Leymerie.

[3] Macculloch, *Geological classification of Rocks*, p. 125.

[4] *Report of the Cornwall polytechnical Society*, 1837. M. Robert Hunt a poursuivi ces recherches. *Memoirs of the Geological Survey of Great Britain*, t. I, p. 433 ; 1846.

[5] Sedgwick, John Herschel, Lyell (*Elements of Geology*), Darwin (*Geological observa-

ont cependant été admises par des savants aussi éminents que de la Bèche[1], Hopkins[2] et Scheerer[3].

Pendant que ces hypothèses se discutaient, un autre caractère, non moins essentiel, était mis en évidence par des observations exactes et nombreuses : c'est que la production du clivage, dans les terrains stratifiés, se montre en rapport, d'une part, avec les actions qui ont déformé les fossiles dans les mêmes couches, d'autre part, avec les axes de redressement et les grandes lignes de dislocation[4]. Selon toute probabilité, ce phénomène devait donc être attribué à des actions mécaniques.

Cette idée, qui paraît aujourd'hui très simple, a été soumise, par M. Sorby, au contrôle de l'expérimentation[5]. Ce savant, auquel on était déjà redevable d'autres recherches ingénieuses, avait préalablement reconnu, en examinant au microscope la disposition de leurs éléments, que les roches feuilletées ont éprouvé une compression. Puis, en mélangeant des paillettes d'oligiste à de l'argile blanche, et en soumettant le mélange à la compression, il obtint une masse nettement feuilletée.

M. John Tyndall alla plus loin[6] : il produisit une structure feuilletée, tout à fait semblable à celle de l'ardoise, dans certaines substances plastiques, comme la terre de pipe et la cire d'abeille, en les comprimant et en leur faisant subir une sorte de laminage.

tions on South America, p. 168). — Boué pense que la chaleur, cause de ce changement de texture, a été apportée par les roches éruptives. — Quenstedt, *Epochen der Natur*, p. 192.

[1] *Report on the geology of Cornwall*, p. 281 ; de la Bèche pensait que ces forces polaires sont en relation avec le magnétisme terrestre.

[2] *On the connexion of geology and terrestrial magnetism* ; 1851.

[3] *Archiv für Mineralogie*, par Karsten, t. XVI, p. 109 ; 1842.

[4] Notamment par M. Baur et par D. Sharpe.

[5] *The Edinburgh new Philosophical Journal*, t. LV, p. 437 ; 1853 ; *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine*, t. XI, p. 20, et t. XII, p. 27 ; 1856.

[6] *The London, Edinb. and Dubl. Phil. Mag.*, t. XII, p. 35 ; 1856.

Des expériences que j'ai faites vers la même époque[1], par d'autres procédés, et dont la figure 88 représente un des résultats, m'ont conduit à une conclusion semblable. Utilisant des presses à balanciers mues par la vapeur, et d'autres moyens énergiques de compression, je reconnus que, pour produire dans l'argile une texture feuilletée, il faut : 1° que la substance puisse éprouver des glissements et s'étendre par un commencement de laminage; 2° que la masse comprimée soit douée d'un degré particulier de plasticité : trop

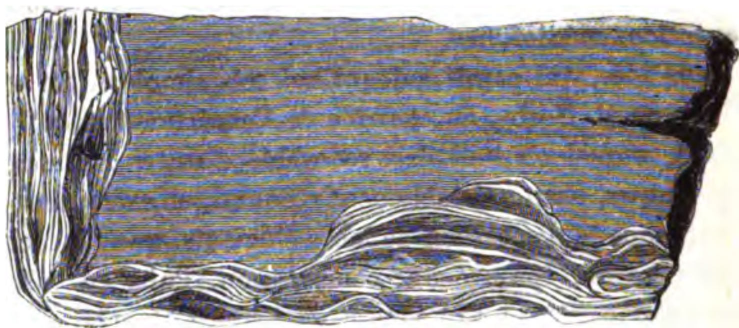


Fig. 88. — Production de la structure schisteuse dans une argile de Villy-en-Trode (Aube) soumise à l'action de la machine à emboutir. — Grandeur naturelle.

sèche, elle se brise; trop molle, elle se lamine, sans que les feuillets puissent s'isoler.

D'un autre côté, le même sujet était abordé théoriquement, par des considérations empruntées à la physique mathématique et à la théorie de l'élasticité, notamment par MM. Hopkins[2], Laugel[3] et le professeur Haughton[4].

Les belles recherches expérimentales de Tresca[5] ont

[1] *Études et expériences synthétiques sur le Métamorphisme*, p. 111 du mém. in-4°, p. 132 du mém. in-8°; 1859-60.
[2] *The Edinb. new Phil. Journal*, t. XLV; 1848.
[3] *Bull. Soc. géol.*, 2e série, t. XII, p. 363; 1855.
[4] *The London, Edinb. and Dubl. Phil. Mag.*, t. XII, p. 198; 1856.
[5] *Mémoires des Savants étrangers*, t. XVIII, p. 733, t. XX, p. 75; 1872.

ouvert un horizon nouveau sur la connaissance des mouvements intérieurs qui se produisent lorsque des corps solides se trouvent soumis à des pressions assez énergiques pour les déformer et les forcer à *s'écouler*, suivant l'expression hardie et juste employée par ce savant. Dans le désir de revenir à l'examen expérimental de l'importante question de la schistosité et de quelques faits qui se rattachent à cette texture, je demandai à Tresca de recourir à sa connaissance approfondie du sujet, et il voulut bien m'accorder son concours de la manière la plus efficace, pour satisfaire au programme que je m'étais proposé. Je dois aussi de vifs remerciements à M. Alfred Tresca, ingénieur civil.

Les nouvelles expériences dont il va être rendu compte ont été exécutées, pour la plupart, avec la presse hydraulique qui a servi aux principales recherches de Tresca sur l'écoulement des solides[1] (fig. 89). L'effort pouvait s'y élever jusqu'à 100 000 kilogrammes de pression totale exercée sur les plaques; mais on est toujours resté notablement au-dessous de cette force.

L'argile sur laquelle on voulait expérimenter, après avoir été amenée à un degré de consistance convenable par la dessiccation, était placée entre des parois verticales de formes cylindrique ou prismatique. Par suite de la pression qu'un piston exerçait sur elle, cette argile était forcée de s'écouler de bas en haut, sous la forme d'un jet, entre les bords d'une ouverture pratiquée dans une matrice métallique, ainsi que dans le sommier supérieur de la presse.

On a fait successivement varier, dans leur forme et dans leur disposition, l'argile soumise à la pression et l'orifice par lequel elle s'écoulait.

[1] Mémoire précité, p. 746.

1° Dans une première série d'expériences, le cylindre était circulaire et l'orifice, également circulaire, était concentrique au cylindre. Les deux diamètres étaient de 10 et de 2 centimètres, c'est-à-dire dans le rapport de 5 à 1 ; les sections et, par conséquent, la vitesse du piston et celle du jet, étaient dans celui de 25 à 1.

En se servant d'argile plastique de Montereau, mélangée

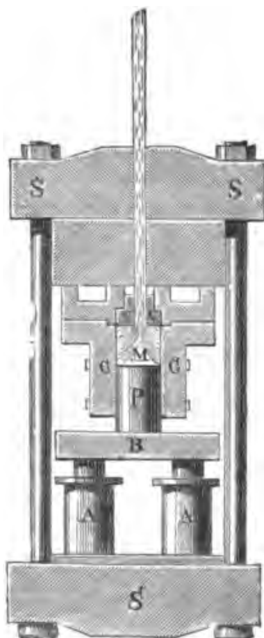


Fig. 89. — Production de la schistosité dans de l'argile soumise à l'action de la presse hydraulique. — P, piston compresseur; M, argile à comprimer; N, matrice en acier; CC, cylindre; S S S, sommiers de la presse; A, A, corps de pompe; B, plateau; un orifice ménagé dans le sommier supérieur permet le passage du jet d'argile; la schistosité de celui-ci est parallèle au sens du mouvement. — Échelle de $\frac{1}{10}$.

de sable quartzeux, on a obtenu une texture fibreuse des mieux caractérisées (fig. 90). De l'argile, que l'on avait mélangée de paillettes de mica, au lieu de quartz, a fourni le même résultat. Ces paillettes manifestent une tendance évidente à se diriger parallèlement au jet; leurs plans sont

orientés de diverses manières, mais disposés de façon à produire, comme dans le premier cas, des couches concentriques à la surface cylindrique du jet. La texture obtenue dans ces deux expériences rappelle, par son aspect, la texture d'une tige de bois de dicotylédone, avec ses couches annuelles; elle reproduit la texture de certaines roches, que l'on a qualifiées de fibreuses (en allemand *flæserig*).

2° En faisant écouler l'argile micacée par un orifice rec-



Fig. 90 — Production de la structure, à la fois schisteuse et concentrique, dans de l'argile forcée à s'écouler par un orifice circulaire Vue d'un échantillon montrant deux sections, l'une suivant l'axe, et l'autre dans le sens perpendiculaire. — Deux fois la grandeur naturelle.

tangulaire placé au centre du cylindre vertical, on a obtenu une texture qui diffère de la précédente. Comme dans le premier cas, les paillettes de mica se placent en totalité parallèlement à l'axe d'écoulement, la plupart parallèles à la grande face, d'autres, en beaucoup plus petit nombre, parallèles à la petite face du rectangle de la section.

3° Afin d'éviter que la matière afflue de tous les points de la masse cylindrique vers le centre, et pour simplifier le phénomène, on a remplacé le cylindre circulaire des expé-



Fig. 91. — Développement de la structure schisteuse dans une argile mélangée de mica et soumise à un écoulement ; cassure parallèle au plan des feuillets.—Grandeur naturelle.

riences précédentes par un prisme rectangulaire ; puis on a produit l'écoulement entre les lèvres d'un orifice également rectangulaire, dont la largeur était précisément celle du prisme de terre. Le rapport des sections était, cette fois, de 10 à 1.

L'argile sableuse, et surtout l'argile mélangée en proportions variables de paillettes de mica, ont acquis une schistosité des mieux caractérisées ; les feuillets sont parallèles à la grande face du jet (fig. 91 et 92).

On a mélangé à l'argile non seulement du mica en petites paillettes, mais aussi en lames carrées, de 4 à 5 millimètres de côté. Ces dernières sont venues se placer, avec une régularité plus grande encore que les paillettes, dans le plan précité, c'est-à-dire parallèlement à la grande face du jet.

Ces diverses pâtes feuilletées artificielles rappellent complètement, par l'aspect de leur cassure, certaines roches naturelles, phyllades quartzifères, schistes micacés et micaschistes.

De l'argile, non mélangée de sable ou de mica, se comporte de même et et acquiert une schistosité d'autant plus fine que la matière se divise elle-même en particules plus ténues.

Des cristaux, autres que ceux de

mica, s'alignent régulièrement dans ce mode d'écoulement. Ainsi, quand à la pâte on ajoute successivement de petites tiges cylindriques, et, à défaut de cristaux de feldspath sanidine, isolés et suffisamment minces, de petites plaques de plomb de même forme, les unes et les autres se dirigent parallèlement au jet. Les plaques en forme de feldspath se



Fig. 92. — Développement de la structure schisteuse, dans une argile mélangée de mica et soumise à un écoulement ; le feuilleté est ici parallèle au sens de la pression. Cassure perpendiculaire aux feuillets. — Grandeur naturelle.

placent, à peu près en totalité, parallèlement à la schistosité, à laquelle elles contribuent, par conséquent, pour leur part.

Comme complément des expériences exécutées sur l'écoulement des substances argileuses, j'en ai fait d'analogues sur des substances ramollies et rendues plastiques par la

chaleur, et pour cela, j'ai profité du concours obligeant de M. Ch. Feil.

L'opération se fit sur un verre riche en plomb (*flint*) et très *tendre*, que l'on fondit dans une moufle. Le verre, refroidi jusqu'à n'être plus très fluide, fut forcé de s'écouler, soit sous l'action d'un piston, soit sous celle d'une vis. L'examen des stries, présentées alors par le flint, montra que le mouvement avait eu lieu comme on pouvait le sup-

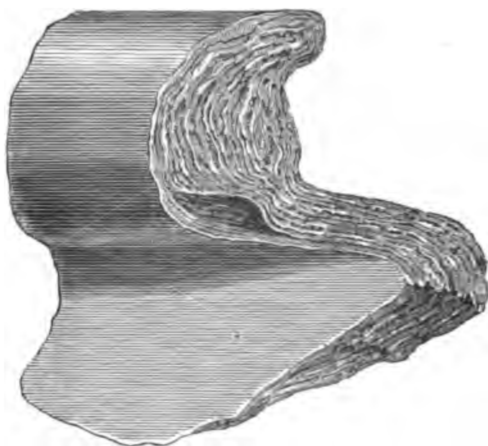


Fig. 93. — Fragment de tuile, offrant une structure schisteuse ordonnée par rapport aux surfaces du moule, parallèlement auxquelles s'est produit l'écoulement de l'argile. — Grandeur naturelle.

poser. Ces stries très fines, accusées par des différences de réfraction, se reconnaissent mieux encore sur des plaques minces.

Sans recourir à des expériences spéciales, on réalise dans certaines opérations industrielles le développement de la structure schisteuse. Ainsi, la fabrication des briques et des tuiles comprend des opérations d'étirement où se trouvent, très souvent, reproduites les conditions de consistance et d'écoulement nécessaires à la schistosité; les figures 93 et 94 en donnent des exemples.

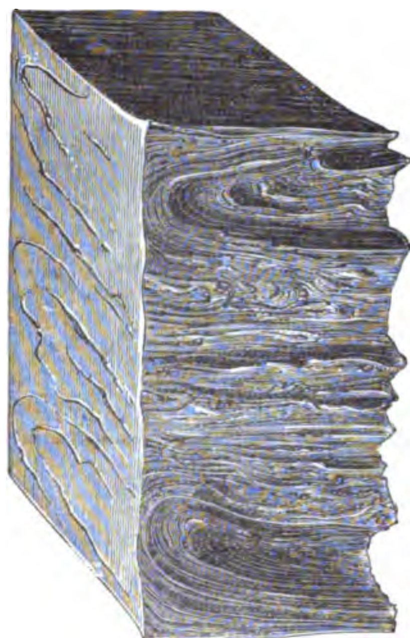


Fig. 94. — Structure schisteuse très contournée développée dans une brique, par l'écoulement, accompagné de rebroussements, auquel l'argile a été soumise pendant la fabrication. — Echelle de $\frac{1}{2}$

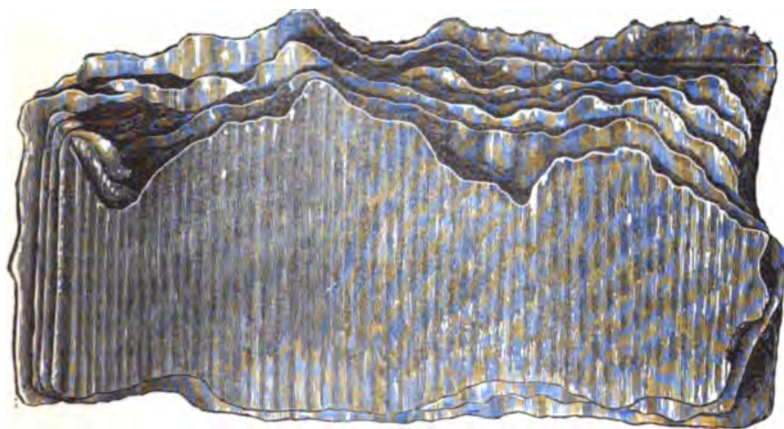


Fig. 95. — Structure schisteuse développée dans la stéarine par la pression exercée, dans un sac de crin, en vue d'en éliminer les matières étrangères. — Grandeur naturelle.

De même l'acide stéarique comprimé à chaud, pour l'ex-

pulsion des graisses liquides, prend une structure feuilletée représentée figure 95.



Fig. 96. — Développement de la structure schisteuse dans le fer, par l'action du laminoir. Échelle de $\frac{1}{2}$



Fig. 97. — Développement de la même structure à un plus haut degré, dans un fer particulièrement impur. — Échelle de $\frac{1}{3}$.

Le fer laminé est très souvent schisteux, c'est-à-dire composé de zones parallèles distinctes par leur éclat (fig. 96 et 97), et l'on sait que l'interposition de matières étran-

[illegible]

[illegible]

[illegible]

de courbure, est représenté par les bélemnites de diverses localités des Alpes, qui ont été tronçonnées, et dont les segments plus ou moins écartés laissaient primitivement entre eux des vides, que des substances minérales sont ultérieurement venues incruster ou remplir.

Lorsqu'un test n'a pas plus d'épaisseur que celui d'un trilobite, il n'est pas difficile de le déformer, en l'empâtant dans de l'argile, que l'on soumet ensuite à une pression.

Quant aux fossiles à test épais, comme une bélemnite ordinaire, leur résistance est trop grande pour qu'on pût la tronçonner au milieu de l'argile, au moins dans les conditions de pression dont on pouvait disposer. Pour remédier à cette difficulté et obtenir une rupture sous un moindre effort, on a empâté, dans de l'argile, des cônes de craie très allongés, ayant la forme d'une bélemnite ordinaire, B (fig. 99). Ce sont ces imitations de bélemnites qui ont été l'objet d'une série d'expériences, dans lesquelles on a produit l'écoulement, tantôt par écrasement, tantôt suivant le sens de la pression ; les figures 100 et 101 représentent des résultats ainsi obtenus.

La première de ces figures nous offre, pour ainsi dire, une exagération du phénomène, les tronçons de la bélemnite étant beaucoup plus écartés qu'ils ne paraissent jamais l'être dans les roches. Quant à l'échantillon de la figure 101, il a été obtenu par voie d'écrasement.

On arrive cependant à déformer les bélemnites naturelles, mais il faut, pour cela, les enchâsser préalablement dans une masse qui offre plus de cohérence que l'argile.

Plusieurs expériences, par voie d'écrasement, ont été faites sur des bélemnites (*Belemnites niger*), qui avaient été enchâssées très exactement, au moyen du moulage, dans une masse de plomb, en forme de parallélépipède. La pièce de plomb était chaque fois soumise à une pression d'environ

50 000 kilogrammes. On a obtenu ainsi des bélemnites tronçonnées, dont les fragments sont plus ou moins espacés et qui, par conséquent, ont augmenté de longueur, exactement



Fig. 99. — Imitation de bélemnite B en craie, placée dans une masse d'argile AA, que l'on force à s'écouler sous le piston P de la presse hydraulique, et destinée à subir un étirement et un tronçonnement. — Échelle de ½.

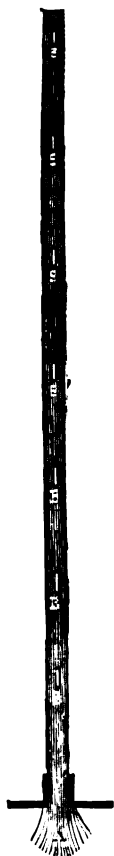


Fig. 100. — Résultat de l'expérience précédente; B,B,B,B, B,B,B, tronçons fortement écartés les uns des autres, dans lesquels la bélemnite de craie a été réduite par l'écoulement de l'argile A. — Échelle de ½.

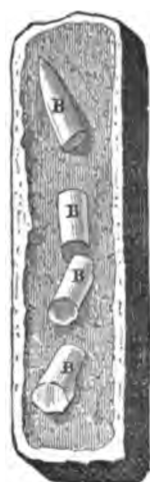


Fig. 101. — Fragment de craie cylindro-conique, imitant une bélemnite naturelle, tronçonné par le laminage de l'argile où il était empâté. — Échelle de ½.

comme les types naturels que l'on avait en vue. L'échantillon (fig. 103), comparé à l'état initial qui est représenté par un moulage (fig. 102), montre bien le changement qui



Fig. 102. — *Belemnites Niger* B, exactement encastrée par le moulage au centre d'un prisme en plomb, formé de deux parties, dont une seule est représentée. Ce prisme est destiné à subir, perpendiculairement à ses plus grandes faces, l'action de la presse hydraulique. — Échelle de $\frac{1}{2}$.



Fig. 103. — Étirement et tronçonnement de la bélemnite de la fig. précédente, par l'action de la presse hydraulique, sur le prisme de plomb où elle était encastrée. — Même échelle que pour la figure précédente.



Fig. 104. — Déformation subie par une pièce de cuivre, à l'effigie de George III, sous l'action du laminoir, et rappelant certaines anamorphoses. — Grandeur naturelle.

s'est produit. Quelques-uns des tronçons se sont allongés, en s'écrasant.

Quant aux simples déformations de fossiles, leur imitation ne présente pas de difficulté. Ainsi, en enchâssant un test d'écrevisse dans une masse de plomb, que l'on comprime ensuite, on le déforme, à la manière des trilobites des ardoises. Cette imitation trouve aussi son analogue, par exemple, dans le laminage par lequel on démonétise à Londres les pièces hors de cours (fig. 104).

Observations théoriques et déductions relatives aux roches schisteuses. — La texture schisteuse des roches n'avait été imitée expérimentalement qu'au moyen d'une pression, exercée perpendiculairement au plan de schistosité. Or, dans les expériences qui font l'objet de ce chapitre, on voit naître un feuilleté des mieux caractérisés, sous des conditions différentes. Car les feuillets s'y produisent, et cela pour des bandes de plusieurs mètres de longueur, *dans le sens même de la pression et du mouvement.*

C'est un résultat qui trouve son application dans l'histoire des roches schisteuses cristallines, à feuillets à peu près verticaux, particulièrement dans celles qui occupent le centre de certains massifs montagneux.

Ces mêmes expériences conduisent aussi à modifier l'explication théorique de la schistosité, qui est généralement admise. Un corps incomplètement solide, ou doué d'une certaine plasticité, étant soumis à une pression énergique, qui le force à s'écouler dans le sens suivant lequel il rencontre le moins de résistance, se comporte à peu près comme le ferait un liquide très visqueux. Dans ce mouvement, les molécules voisines ne marchent pas uniformément; les différentes vitesses qu'acquièrent les molécules contiguës les font glisser les unes sur les autres. De là, un alignement prononcé des éléments de formes diverses, cristaux, lamelles aplaties ou particules microscopiques.

Cette texture schisteuse ou feuilletée, conséquence directe d'un glissement, est nécessairement ordonnée par rapport au mode et à la direction de l'écoulement : c'est ce qu'on constate pour les diverses dispositions successivement employées dans les expériences.

On voit donc que c'est à tort que certains géologues ont voulu distinguer, dans les roches schisteuses, d'une part, le clivage, d'autre part, l'alignement des cristaux connu sous le nom de foliation ou de lamination. Ces deux caractères remarquables dérivent de la même cause, et l'expérience les produit dans des conditions identiques et simultanément : aussi les avons-nous compris ici sous le nom unique de schistosité[1].

Il n'est pas nécessaire que la masse plastique soit mélangée de parties *visiblement* différentes, pour acquérir la texture schisteuse. Une même substance, tout en étant chimiquement homogène, peut ne pas l'être dans sa condition physique, par exemple, dans son degré de cohésion. C'est ce qui paraît arriver en général, même dans des corps, comme le plomb métallique ou le verre fondu, dont l'uniformité d'aspect ne ferait pas soupçonner de semblables différences[2].

En outre, dans les expériences faites par voie d'écoulement, aussi bien que dans celles de compression directe, on voit qu'il suffit que les particules subissent un déplacement très faible, de quelques centimètres à peine, pour qu'elles s'alignent et qu'un feuilleté très régulier en soit la conséquence.

L'examen microscopique des masses feuilletées artificiellement contribue encore à les faire assimiler aux roches

[1] Le résultat auquel l'observation avait conduit Darwin et Sharpe est donc pleinement consacré par 'expérience.

[2] Pour le plomb, le fait s'est manifesté dans une expérience faite par Tresca sur un cylindre de ce métal.

feuilletées naturelles. Des sections très minces, pratiquées sur ces pâtes perpendiculairement aux feuillets, soit après une simple dessiccation à la température ordinaire, soit après une calcination au rouge, montrent des feuillets minces, qui se dessinent par des teintes différentes et qui se contournent autour des grains quartzeux, à la manière de ce qui arrive dans les micaschistes, pour les feuillets de mica qui enveloppent chaque grenat.

Ce qui ajoute encore à leur ressemblance avec les roches naturellement feuilletées, c'est la manière dont ces produits d'expérience se comportent, quant à la conductibilité de la chaleur, soit à l'état cru, soit après la cuisson. M. Jannettaz,



Fig. 105. — Courbe elliptique montrant comment varie la conductibilité thermique, suivant la direction, dans de l'argile rendue artificiellement schisteuse par écoulement; c'est la reproduction d'un caractère essentiel des roches schisteuses naturelles. — Grandeur naturelle.

qui a bien voulu, sur ma demande, en soumettre quelques-uns à l'expérience, y a reconnu, sur les tranches des feuillets, et même dans leur plan, des ellipses analogues, par la dimension relative de leurs axes, à celles qui se dessinent sur les schistes naturels (fig. 105).

On peut de plus constater ici, avec exactitude, comment les axes de conductibilité sont placés par rapport aux directions des mouvements relatifs, sous l'action desquels la substance s'est écoulée. Cette relation peut être mise à profit pour l'histoire physique des roches anciennes.

Il importe de remarquer que toutes les actions d'écoulement ou d'écrasement, qui ont imité la déformation des fossiles et l'écartement des bélemnites, ont, en même temps,

produit le feuilleté dans l'argile qui enveloppait ces corps. C'est une coïncidence conforme à celle qu'avait signalée l'observation des faits géologiques. De plus, l'existence de vides, laissés entre les tronçons des bélemnites étirées artificiellement, ainsi que la conservation, par ces vides, de la forme du fossile, offrent, avec des échantillons naturels, une analogie significative; car ce double caractère prouve que l'étirement a eu lieu lorsque les roches rendues, il est vrai, plastiques par l'énergie de la pression, étaient cependant à l'état solide. Les expériences montrent, en effet, que dans une substance pâteuse les vides se déforment, et puis se comblent, au moins partiellement, par des bavures, au fur et à mesure de leur production.

D'un autre côté, l'expérience montre, comme on l'a vu plus haut, figure 98, page 223, que la schistosité peut se développer dans des masses à peu près solides, telles que le plomb. Il en a sans doute été de même pour des roches, comme celles du mont Lachat, qui ont été rendues schisteuses, en même temps que des bélemnites s'y étiraient.

La texture feuilletée peut se produire aussi par des procédés autres que celui qui vient d'être mentionné[1].

Le moyen qui se présente naturellement à l'esprit est analogue à celui par lequel on prépare les pâtisseries feuilletées[2]. Mais ce procédé ne paraît avoir que bien peu d'analogie avec les phénomènes naturels.

D'un autre côté, je dois rappeler que j'ai obtenu autrefois le feuilleté du verre transformé, dans mes expériences sur la formation d'espèces minérales dans l'eau suréchauffée.

[1] Je ne mentionnerai que pour mémoire le clivage que M. Fox a annoncé se produire dans l'argile, sous l'influence de courants voltaïques.

[2] On enduit de mica ou de graisse une couche d'argile, puis, en repliant cette couche un certain nombre de fois sur elle-même et en la laminant, on obtient une masse feuilletée, qui ressemble aux roches schisteuses naturelles et qui participe également de leurs propriétés, en ce qui concerne la conductibilité de la chaleur.

ions très minces, pratiquées
ment aux feuillets, soit après
a température ordinaire, soit
ouge, montrent des feuillets
des teintes différentes et qui se
ains quartzeux, à la manière de
chistes, pour les feuillets de mica
enat.

leur ressemblance avec les roches
c'est la manière dont ces produits
ent, quant à la conductibilité de la
, soit après la cuisson. M. Jannettaz,



ontrant comment varie la conductibilité thermique, suivant la
lue artificiellement schisteuse par écoulement; c'est la repro-
el des roches schisteuses naturelles. — Grandeur naturelle.

ur ma demande, en soumettre quelques-
y a reconnu, sur les tranches des feuillets,
ur plan, des ellipses analogues, par la
e de leurs axes, à celles qui se dessinent
aturels (fig. 105).

us constater ici, avec exactitude, comment
uctibilité sont placés par rapport aux direc-
vements relatifs, sous l'action desquels la
t écoulée. Cette relation peut être mise à
istoire physique des roches anciennes.

de remarquer que toutes les actions d'écoule-
crasement, qui ont imité la déformation des
cartement des bélemnites, ont, en même temps,

Hælleflinta, si souvent rubanées, appartiennent à la même catégorie.

Dans le mélaphyre, comme de Buch l'a reconnu pour celui du Tyrol, les cristaux d'oligoclase sont souvent à peu près alignés[1]. Je ne ferai que mentionner, au même point de vue, la diabase, le gabbro, l'éclogite, l'hypersthénite, la serpentine[2], l'anamésite et la minette (par exemple, celle des Vosges)[3].

La texture feuilletée a été, depuis longtemps, observée dans les divers types de roches trachytiques, qui sont devenus schistoïdes, rubanés ou tégulaires, par le parallélisme des tables de sanidine. Aux environs du Puy-en-Velay, le trachyte se divise en tables et en dalles que l'on y exploite[4]. Parmi les exemples que l'on pourrait citer, je me bornerai à rappeler ceux des Iles Ponces, sur lesquels Poulett Scrope a appelé l'attention[5], et celui du Drachenfels, près de Bonn[6].

On sait d'ailleurs que les roches trachytiques produites actuellement par les volcans, sous forme de coulées de laves, prennent également la structure schisteuse. A Santorin, d'après M. Fouqué, qui a fait une étude classique de cette île remarquable, il est des laves qui peuvent servir comme dalles, à la manière des micaschistes. Des laves feuilletées, doléritiques et feldspathiques, ont été recueillies par M. Vélain aux îles Saint-Paul et Amsterdam, et par M. Filhol, à l'île Campbell, ainsi qu'il ressort des collections déposées au

[1] Von Richthofen, *Bemerkungen über die Trennung von Melaphyr und Augit-Porphyr*, p. 35.

[2] La serpentide et l'euphotide dans les Grisons, d'après M. Studer.

[3] Delesse, Mémoires sur les Roches des Vosges : minette (*Annales des Mines*, 5e sér., t. X, p. 517), p. 541, 1856), — Daubrée, *Descr. géol. et min. du dép. du Bas-Rhin*, p. 35.

[4] Bertrand-Roux, *Description géognostique des environs du Puy-en-Velay*, p. 114-119.

[5] *Trans. Geol. Soc.*, t. II, p. 195.

[6] Von Rath, *Das Siebengebirge*. Les cristaux sont brisés, ce qui prouve qu'ils étaient formés quand la roche elle-même jouissait encore d'une certaine plasticité.

d'argile, sont devenus schisteux (calcschistes de la Maurienne, quartzophyllades micacés).

En général, la schistosité se rattache, comme on vient de le voir, aux mouvements qui ont ployé les couches. Cependant il est des roches qui paraissent avoir pris une texture analogue à celle dont il vient d'être question, sans qu'elles aient cessé d'être horizontales. Tels sont notamment les schistes bitumineux du terrain permien (Igornay, près Autun, Thuringe, etc.) et peut-être aussi les bogheads tertiaires de Ménat (Puy-de-Dôme) et d'autres provenances, les marnes magnésiennes de Saint-Ouen, et certaines marnes du grès bigarré (Letten). Des roches qui avaient originairement une consistance très favorable au développement de la schistosité ont pu acquérir ce caractère, sous la simple pression des masses qui leur ont été superposées.

Il est des géologues qui ont regardé le feuilleté des roches cristallines, telles que le gneiss, comme un vestige de stratification, et qui ont assimilé les feuillets à des couches minces[1]. Cette supposition a servi à appuyer le nom de *métamorphiques*, qu'on a osé étendre à la totalité des roches de cette catégorie. Bien que j'aie cherché ailleurs à montrer l'importance du métamorphisme, je n'ai pas cessé de m'élever contre une conclusion hypothétique aussi absolue. Entre certains gneiss et le granite, il n'y a pas plus de distance qu'entre les laves feuilletées et les laves massives. L'observation qui précède suffit pour montrer combien il y a lieu, à plus forte raison, d'être circonspect dans les supputations, que l'on prétend faire, dans divers pays, des épaisseurs de ces roches.

Dans les terrains cristallisés dont il s'agit, la schistosité

[1] L'origine éruptive de certains gneiss et de leptynites a été soutenue par divers géologues, notamment par Naumann et par Élie de Beaumont. *Bull. Soc. géol.*, 2e série, t. IV, p. 130; 1847.



Fig. 91. — Développement de la structure schisteuse dans une argile mélangée de mica et soumise à un écoulement ; cassure parallèle au plan des feuillets.—Grandeur naturelle.

riences précédentes par un prisme rectangulaire ; puis on a produit l'écoulement entre les lèvres d'un orifice également rectangulaire, dont la largeur était précisément celle du prisme de terre. Le rapport des sections était, cette fois, de 10 à 1.

L'argile sableuse, et surtout l'argile mélangée en proportions variables de paillettes de mica, ont acquis une schistosité des mieux caractérisées ; les feuillets sont parallèles à la grande face du jet (fig. 91 et 92).

On a mélangé à l'argile non seulement du mica en petites paillettes, mais aussi en lames carrées, de 4 à 5 millimètres de côté. Ces dernières sont venues se placer, avec une régularité plus grande encore que les paillettes, dans le plan précité, c'est-à-dire parallèlement à la grande face du jet.

Ces diverses pâtes feuilletées artificielles rappellent complètement, par l'aspect de leur cassure, certaines roches naturelles, phyllades quartzifères, schistes micacés et micaschistes.

De l'argile, non mélangée de sable ou de mica, se comporte de même et et acquiert une schistosité d'autant plus fine que la matière se divise elle-même en particules plus ténues.

Des cristaux, autres que ceux de

mica, s'alignent régulièrement dans ce mode d'écoulement. Ainsi, quand à la pâte on ajoute successivement de petites tiges cylindriques, et, à défaut de cristaux de feldspath sanidine, isolés et suffisamment minces, de petites plaques de plomb de même forme, les unes et les autres se dirigent parallèlement au jet. Les plaques en forme de feldspath se

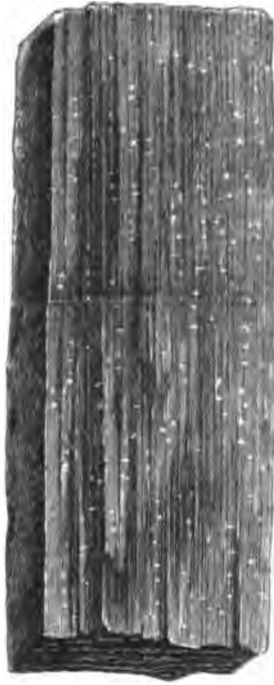


Fig. 92. — Développement de la structure schisteuse, dans une argile mélangée de mica et soumise à un écoulement ; le feuilleté est ici parallèle au sens de la pression. Cassure perpendiculaire aux feuillets. — Grandeur naturelle.

placent, à peu près en totalité, parallèlement à la schistosité, à laquelle elles contribuent, par conséquent, pour leur part.

Comme complément des expériences exécutées sur l'écoulement des substances argileuses, j'en ai fait d'analogues sur des substances ramollies et rendues plastiques par la

ment sur ces passages[1]. Ces auteurs ajoutent que les amphibolites deviennent, de même, schistoïdes jusque dans le centre de leurs massifs.

Enfin, j'ajouterai que la collection du Muséum présente, dans les vitrines exposées au public, une série de ces roches cristallines schisteuses, recueillie par Cordier et provenant des environs de Deville, où j'ai eu également occasion de les étudier.

Ce que montrent les roches schisteuses cristallines des Ardennes trouve encore ses analogues dans bien d'autres contrées et pour d'autres roches. Comme on l'a dit plus haut, il n'y a guère de roches cristallines qui ne soient susceptibles de se présenter à l'état schistoïde. C'est ainsi que le granite, la protogine, la syénite, deviennent graduellement schisteux, dans une foule de localités.

Parmi les faits semblables que l'on pourrait citer en grand nombre, je me bornerai à rappeler d'autres cas problématiques, signalés dans des roches anciennes de la Belgique, ainsi que le passage complet du porphyre au schiste, signalé par M. de Dechen en Westphalie, dans la contrée de la Lenne. Les roches volcaniques récentes, particulièrement les trachytes et les phonolithes, offrent de toutes parts de tels passages.

Depuis que l'on a démontré expérimentalement les conditions mécaniques dans lesquelles une masse, incomplètement solidifiée, peut acquérir la structure schisteuse, sous l'influence d'un léger déplacement de ses particules, on ne saurait voir, dans la conformité de structure qui vient d'être signalée, une preuve de l'origine sédimentaire des roches cristallines et schistoïdes. Supposons que ces masses érup-

[1] Voir notamment p. 111 de leur Mémoire sur les roches plutoniennes de la Belgique et de l'Ardenne française.

tives aient été originairement subordonnées aux roches siluriennes et cambriennes, et interstratifiées dans ces dernières, par exemple, comme les nappes de porphyre feldspathique le sont dans les terrains permien et triasique de diverses contrées, ou comme le basalte l'est fréquemment dans les couches tertiaires : si ces masses éruptives n'étaient pas encore parfaitement solidifiées, lorsqu'un mouvement général a produit le feuilleté des roches argileuses dans lesquelles elles sont enclavées, elles ont dû participer à ce mouvement, et leur texture en a nécessairement subi la conséquence.

En résumé, le caractère schisteux a été imprimé très fréquemment aux roches éruptives, et souvent, en même temps qu'aux roches sédimentaires voisines, de manière à présenter un parallélisme général. On conçoit qu'un tel parallélisme puisse laisser dans le doute sur l'origine, éruptive ou sédimentaire, de certaines roches cristallines.

d'autres lieux et, par exemple, dans les Vosges septentrionales autour du massif du Champ-de-Feu.

Au petit Donon de Rothau, il se présente, en outre, un fait des plus caractéristiques[1]. Non loin du granite, le terrain de transition est traversé par une roche amphibolique. Dans les parties où sont accumulées des flustres et des *calamopora spongites* avec des noyaux de calcaire lamellaire, il apparaît de l'épidote, de l'amphibole et du quartz à l'état cristallisé. Des cavités voisines de formes indéterminées, mais que leur ressemblance avec les premières doit faire considérer aussi comme des empreintes madréporiques, sont tapissées de cristaux brillants des mêmes substances. C'est dans l'une de ces géodes que j'ai reconnu l'axinite, avec ses faces nommées *l* et *s* par Haüy. On peut croire que l'acide borique a été introduit à la suite de l'éruption rocheuse, comme dans les amas métallifères du Sud-Ouest de la Norwège, où l'on a trouvé l'axinite[2].

Le granite, dont l'intrusion a contribué pour une large part à la constitution de la chaîne des Pyrénées, y a produit les mêmes phénomènes qu'a décrits Durocher et que M. Barrois a également reconnus dans les Asturies et la Galice, où la tourmaline est associée aux schistes mâclifères.

En Cornouailles, chaque îlot granitique est également entouré d'auréoles métamorphiques. De la Bêche les a parfaitement fait connaître dans son classique ouvrage sur cette presqu'île, et les a figurées d'une manière expressive sur sa carte, par une teinte dégradée autour de chaque protubérance. La tourmaline[3] figure parmi les minéraux qui ont été ainsi engendrés.

Des exemples non moins nets sont visibles dans le

[1] *Comptes Rendus*, t. XVIII, p. 870, 1844.
[2] *Annales des Mines*, 4e série, t. III.
[3] Allport. *Quarterly Journal*, 1870.

district des lacs du nord de l'Angleterre, autour du granite de Skiddaw. L'altération s'étend jusqu'à 3 à 4 kilomètres de la masse éruptive et plus près, se montrent des cristaux de chiastolite sur une largeur excédant rarement 400 mètres[1].

Le sud-ouest de l'Irlande, dans le comté de Wicklow, présente des effets très caractérisés de métamorphisme autour de masses granitiques, qui se développent du nord-est au sud-ouest sur une longueur de 100 kilomètres avec une largeur de 8 à 11 kilomètres.

Au Harz les roches enveloppant le granite, qui ont depuis longtemps reçu le nom de *hornfels*, décèlent des actions non moins significatives.

En Bavière, dans le Fichtelgebirge, aux États-Unis, dans le New-Hampshire[2] et dans bien d'autres lieux, il serait facile de signaler des faits analogues.

Les transformations dues aux intercalations de granite se sont propagées sur des distances variables qui, de quelques centaines de mètres, vont exceptionnellement à 1500, 2000 et 3000 mètres. Elles se sont généralement propagées plus loin dans les angles rentrants de la masse éruptive.

La chaleur seule ne peut expliquer ces faits, ainsi que Durocher l'avait reconnu. Le granite qui a pénétré à un état plastique nous apprend, par les inclusions que renferme encore sa pâte, que des gaz, des vapeurs, des liquides parmi lesquels l'eau se trouvait très probablement, ont dû accompagner sa sortie et contribué aux actions que nous venons de signaler.

[1] Ward. *Quarterly Journal*, t. XXXII, 1876.
[2] Hawes. *American journal*, 1881, t. XXI, p. 21.

ouvert un horizon nouveau sur la connaissance des mouvements intérieurs qui se produisent lorsque des corps solides se trouvent soumis à des pressions assez énergiques pour les déformer et les forcer à *s'écouler*, suivant l'expression hardie et juste employée par ce savant. Dans le désir de revenir à l'examen expérimental de l'importante question de la schistosité et de quelques faits qui se rattachent à cette texture, je demandai à Tresca de recourir à sa connaissance approfondie du sujet, et il voulut bien m'accorder son concours de la manière la plus efficace, pour satisfaire au programme que je m'étais proposé. Je dois aussi de vifs remerciements à M. Alfred Tresca, ingénieur civil.

Les nouvelles expériences dont il va être rendu compte ont été exécutées, pour la plupart, avec la presse hydraulique qui a servi aux principales recherches de Tresca sur l'écoulement des solides[1] (fig. 89). L'effort pouvait s'y élever jusqu'à 100 000 kilogrammes de pression totale exercée sur les plaques; mais on est toujours resté notablement au-dessous de cette force.

L'argile sur laquelle on voulait expérimenter, après avoir été amenée à un degré de consistance convenable par la dessiccation, était placée entre des parois verticales de formes cylindrique ou prismatique. Par suite de la pression qu'un piston exerçait sur elle, cette argile était forcée de s'écouler de bas en haut, sous la forme d'un jet, entre les bords d'une ouverture pratiquée dans une matrice métallique, ainsi que dans le sommier supérieur de la presse.

On a fait successivement varier, dans leur forme et dans leur disposition, l'argile soumise à la pression et l'orifice par lequel elle s'écoulait.

[1] Mémoire précité, p. 746.

raître le caractère sédimentaire de la roche, comme il arrive dans le pays de Galles, le Taunus et les Ardennes.

Dans ces contrées et d'autres de l'Europe occidentale sur lesquelles les études géologiques se sont portées d'abord, ce sont les terrains les plus anciens qui présentent des caractères cristallins de ce genre ; aussi a-t-on cru pendant longtemps que cet état minéralogique était l'apanage des dépôts sédimentaires formés à ces époques reculées. De là le nom de terrains de *transition* que leur avait donné Werner, supposant que dans la mer où ces roches s'étaient formées, à la suite des terrains primitifs ou cristallins, il continuait à s'opérer une précipitation chimique de silicates, en même temps que commençaient à s'y former des dépôts mécaniques.

Plus tard, on a reconnu qu'il n'en est pas ainsi et que cet état semi-cristallin résulte certainement d'une transformation postérieure à la sédimentation.

Sans insister ici sur la nature des divers changements qui se sont produits dans ces terrains, je me bornerai à remarquer qu'aux roches argileuses se sont substitués des phyllades. Ces roches, bien que consistant essentiellement comme les premières, en silicates d'alumine, en diffèrent tout d'abord par leur cohésion ; elles se refusent à se délayer dans l'eau, ainsi que chacun peut le constater sur les variétés employées sous le nom d'ardoises, pour couvrir les habitations.

Des combinaisons cristallisées diverses y ont en effet pris naissance; Sauvage l'avait déjà clairement reconnu, il y a plus de quarante ans, à la suite de ses importantes recherches chimiques sur les phyllades des Ardennes[1]. C'est ce que l'examen microscopique a bien démontré à MM. Re-

[1] *Annales des Mines*, 4e série, t. VII, p. 411, 1845.

CHAPITRE II

MÉTAMORPHISME RÉGIONAL

Métamorphisme de composition minéralogique.

Ce n'est pas seulement à proximité des roches éruptives que les roches stratifiées ont subi des modifications très notables.

Comme premières phases de ces modifications, nous en avons signalé plus haut qui se sont produites, sans qu'il y ait eu formation de nouvelles espèces minérales, comme étant le résultat d'un simple départ accompagné d'une cristallisation. Telles sont les veines calcaires des marbres et les veines quartzeuses des quartzites et des phyllades.

Mais il est aussi des changements plus avancés.

Des massifs considérables de roches sédimentaires, occupant des pays entiers, montrent un métamorphisme prononcé, lors même qu'il est impossible de découvrir au milieu de ces terrains le moindre affleurement de roches éruptives.

Cette modification est facile à constater dans les contrées où elle est assez peu intense pour n'avoir pas fait dispa-

raître le caractère sédimentaire de la roche, comme il arrive dans le pays de Galles, le Taunus et les Ardennes.

Dans ces contrées et d'autres de l'Europe occidentale sur lesquelles les études géologiques se sont portées d'abord, ce sont les terrains les plus anciens qui présentent des caractères cristallins de ce genre ; aussi a-t-on cru pendant longtemps que cet état minéralogique était l'apanage des dépôts sédimentaires formés à ces époques reculées. De là le nom de terrains de *transition* que leur avait donné Werner, supposant que dans la mer où ces roches s'étaient formées, à la suite des terrains primitifs ou cristallins, il continuait à s'opérer une précipitation chimique de silicates, en même temps que commençaient à s'y former des dépôts mécaniques.

Plus tard, on a reconnu qu'il n'en est pas ainsi et que cet état semi-cristallin résulte certainement d'une transformation postérieure à la sédimentation.

Sans insister ici sur la nature des divers changements qui se sont produits dans ces terrains, je me bornerai à remarquer qu'aux roches argileuses se sont substitués des phyllades. Ces roches, bien que consistant essentiellement comme les premières, en silicates d'alumine, en diffèrent tout d'abord par leur cohésion ; elles se refusent à se délayer dans l'eau, ainsi que chacun peut le constater sur les variétés employées sous le nom d'ardoises, pour couvrir les habitations.

Des combinaisons cristallisées diverses y ont en effet pris naissance ; Sauvage l'avait déjà clairement reconnu, il y a plus de quarante ans, à la suite de ses importantes recherches chimiques sur les phyllades des Ardennes[1]. C'est ce que l'examen microscopique a bien démontré à MM. Re-

[1] *Annales des Mines*, 4e série, t. VII, p. 411, 1845.

nard[1], Mallard, Barrois et d'autres lithologistes. On y discerne de nombreuses espèces minérales, principalement la séricite, la chloritoïde ou chlorite et le quartz ; en outre, de l'ottrélite, de la staurotide, de la tourmaline, du zircon, du grenat, de la pyrophyllite, de la magnétite, de l'oligiste, de l'ilménite, du rutile, de la pyrite et de la pyrrhotine.

Ce qui confirme pleinement la supposition que l'état minéralogique de ces terrains n'est pas une conséquence nécessaire de leur ancienneté, c'est que des couches qui en sont contemporaines, c'est-à-dire appartenant aussi aux systèmes les plus anciens, ne participent pas à ces caractères cristallins. Il en est ainsi pour les couches siluriennes dans le nord de l'Europe, en Suède et en Russie, ainsi que dans l'Amérique du Nord, aux États-Unis et au Canada. Dans ces contrées se présentent des couches argileuses, non moins que dans les terrains plus récents.

Ces contrastes minéralogiques dans les terrains anciens de ces divers pays sont en rapport avec des différences notables de gisement. Au lieu d'être fortement disloquée, comme dans les premières contrées qui ont été mentionnées, la stratification dans ces dernières a conservé son horizontalité première. C'est un fait important qui s'expliquera plus loin.

D'autre part, il existe des pays entiers où des massifs considérables de terrains moins anciens ont subi des transformations profondes.

Les Alpes, qui seront à jamais une région classique pour la géologie, tant à cause des actions dynamiques qui ont donné naissance à cette chaîne, que par les profondes et imposantes déchirures dans lesquelles elle expose sa con-

[1] *Bull. du Museum d'Hist. nat. de Belgique*, t. I, 1882 et t. II, 1883, et *Bull. Soc. géolog.*, 3e série, t. XI, p, 638, 1882.

stitution interne, fournissent des observations fondamentales pour la théorie du métamorphisme.

Ainsi que l'a reconnu Brochant dès 1808, on y observe fréquemment des passages graduels des roches sédimentaires à des roches cristallines, qui parfois renferment des vestiges de fossiles secondaires. Lorsqu'on arrive dans cette chaîne et qu'on se trouve en présence des roches des diverses périodes qui entrent dans sa constitution, carbonifères, triasiques, jurassiques et tertiaires, on est surpris de la physionomie générale que présentent ces roches, comparées aux masses lithologiques du même âge du centre de la France et des pays où elles sont restées horizontales.

Le terrain carbonifère renferme des couches qu'on pourrait parfois confondre avec des micaschites ou des gneiss. Des quartzites qu'on est fondé à attribuer au trias y remplacent les grès : le calcaire et la dolomite du même groupe sont fréquemment parsemés de cristaux, parfois assez volumineux et parfaitement nets, de feldspath albite, par exemple au Bourget près Modane.

Une influence générale a donc agi sur un grand espace et a affecté les roches de tous les âges, y compris l'étage inférieur des terrains tertiaires, c'est-à-dire une série de couches épaisses de plusieurs milliers de mètres, quoique les roches éruptives soient très rares dans ce massif.

Ici encore, il importe de le remarquer, comme pour les terrains plus anciens, ces transformations sont en rapport avec des dislocations.

Dans les diverses contrées où les masses pierreuses ont été transformées, les combustibles charbonneux, dont la nature n'est pas moins impressionable, ont été eux-mêmes modifiés. Ils sont représentés par de l'anthracite, non-seulement dans la Basse-Loire et la Sarthe, mais aussi dans les Alpes du Dauphiné et de la Maurienne. Il en a été de même

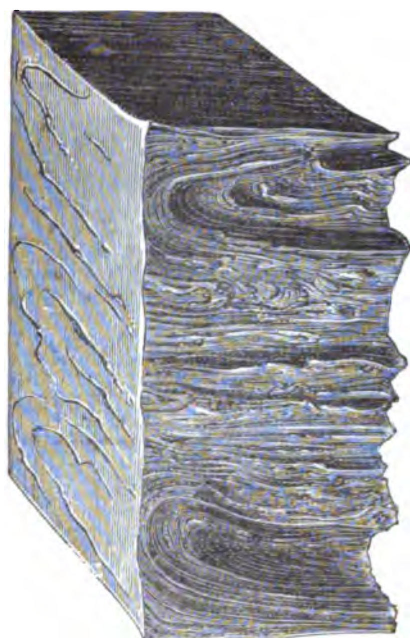


Fig. 94. — Structure schisteuse très contournée développée dans une brique, par l'écoulement, accompagné de rebroussements, auquel l'argile a été soumise pendant la fabrication. — Échelle de $\frac{1}{2}$

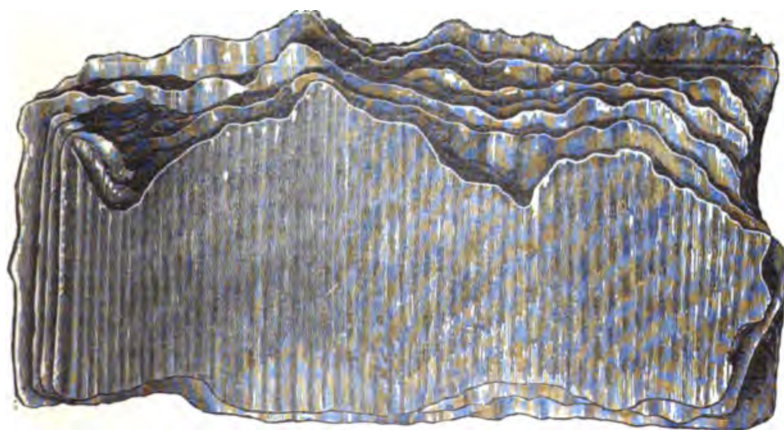


Fig. 95. — Structure schisteuse développée dans la stéarine par la pression exercée, dans un sac de crin, en vue d'en éliminer les matières étrangères. — Grandeur naturelle.

De même l'acide stéarique comprimé à chaud, pour l'ex-

Enfin certaines masses, évidemment éruptives, en offrent des exemples. Le développement considérable des masses schisteuses dans l'écorce terrestre n'est pas moins digne d'attention que leur diversité. Il importe donc de rechercher les causes qui ont déterminé cette disposition dans les particules des roches.

La *schistosité* ou *fissilité* a été souvent désignée sous le nom de *clivage*, particulièrement dans les roches stratifiées. Au clivage se rattache, dans les roches cristallisées, un caractère analogue, que l'on a cru devoir désigner sous un nom particulier, celui de *foliation* ou de *lamination*. Les gneiss et les leptynites en offrent les exemples les plus connus.

Avant de présenter les résultats d'expériences, qui ont eu pour but d'éclairer et de préciser les conditions dans lesquelles cette texture a pris naissance, il convient de rappeler succinctement les faits caractéristiques, auxquels l'observation a conduit sur ce sujet, faits qui ont servi d'objectif aux expériences.

Faits acquis par l'observation relativement à la schistosité. — Le nom de clivage, qui est emprunté à la cristallographie, représente, en effet, dans les roches, un caractère assez analogue à ceux que possèdent les cristaux. On sait qu'un rhomboèdre de spath d'Islande, parfaitement transparent, n'ayant aucune fissure perceptible à l'œil, se brise très facilement suivant une série de plans parallèles à ses faces. Cette propriété remarquable est en rapport, comme le démontrent les caractères optiques, avec les différences que présentent le groupement moléculaire, suivant les direc-

[1] Déjà Vallérius dans sa classification, avait fait le groupe des *fissilia;* de Saussure employait le nom expressif de *roches feuilletées*.

l'on peut constater çà et là sur la périphérie de chaque mamelon granitique.

A proximité de ces protubérances granitiques, les roches diverses et particulièrement les phyllades ont subi des transformations minéralogiques plus ou moins avancées et sur des distances variables, qui excèdent souvent plusieurs centaines de mètres. Déjà il y a un demi-siècle, un éminent géologue, de Boblaye, signalait un fait des plus remarquables: la présence d'orthis, de spirifères et de calymènes au milieu de roches schisteuses contenant en même temps des mâcles de plusieurs centimètres de longueur. Des faits du même genre ont été récemment étudiés d'une manière très précise par M. Barrois autour du massif granitique de Rostrenen[1].

La formation de la variété d'andalousite, connue sous le nom de mâcle ou de chiastolite, présente des circonstances très significatives pour remonter à la cause du métamorphisme.

C'est un silicate d'alumine, cristallisé en prismes droits qui atteignent souvent quelques centimètres de longueur et qui coupent nettement les feuillets du schiste.

Lorsqu'on en examine la cassure, on voit très souvent qu'au lieu d'être monochrôme, elle présente deux teintes, parfaitement distinctes et qui tranchent l'une sur l'autre : le blanc et le noir. Il en résulte des dessins variés : tantôt une croix noire formée par les deux diagonales du rectangle sur un fond blanc, tantôt sur le même fond blanc et au centre du rectangle, un plus petit rectangle noir.

L'origine de ces dispositions et d'autres qu'il serait trop long de rappeler, s'explique facilement. Le phyllade qui sert de matrice à ces cristaux est lui-même un silicate alu-

[1] *Bulletin de la Société géologique du Nord*, t. XII, p. 1, 1884.

mineux, mais impur et rendu en général noirâtre par une certaine quantité de matières charbonneuses. Un mouvement moléculaire s'est produit dans ce phyllade. Les cristaux ainsi séparés de la pâte, se sont nécessairement épurés, comme il arrive en général dans la cristallisation ; de là la couleur blanche d'une partie de ces cristaux. Mais la matière obéissant à la force de cristallisation n'a pu se réunir, sans entraîner avec elle des impuretés, qui ne sont autres que les parties noires disposées symétriquement dans le cristal. C'est ce qui arrive dans certaines cristallisations artificielles.

Un même cristal cassé sur plusieurs points de sa longueur, ou bien coupé suivant son axe montre clairement, par la manière dont la substance blanche a emprisonné les parties noires, que ces dernières sont réellement accidentelles, et de plus, que ces cristaux n'existaient certainement pas originairement dans le phyllade. Ils sont postérieurs non seulement à cette roche, mais aussi au développement de son feuilleté.

Cette production de mâcles dans les phyllades ne s'y est pas faite fortuitement ; elle est, en général, en rapport avec les contours des épanchements de granite.

Un autre silicate, la staurotide, s'est produit dans les mêmes conditions.

Les groupements en forme de croix que ces cristaux présentent fréquemment les ont fait remarquer depuis longtemps et connaître sous le nom de *croisettes* : c'est ainsi qu'ils figurent depuis des siècles dans les armoiries des Rohan.

Le mica s'est bien plus souvent produit encore que la mâcle et la staurotide dans les phyllades, à proximité des masses granitiques qui les traversent. En approchant du granite, le schiste devient souvent de plus en plus micacé.

Des faits semblables ont été constatés dans beaucoup

d'autres lieux et, par exemple, dans les Vosges septentrionales autour du massif du Champ-de-Feu.

Au petit Donon de Rothau, il se présente, en outre, un fait des plus caractéristiques[1]. Non loin du granite, le terrain de transition est traversé par une roche amphibolique. Dans les parties où sont accumulées des flustres et des *calamopora spongites* avec des noyaux de calcaire lamellaire, il apparaît de l'épidote, de l'amphibole et du quartz à l'état cristallisé. Des cavités voisines de formes indéterminées, mais que leur ressemblance avec les premières doit faire considérer aussi comme des empreintes madréporiques, sont tapissées de cristaux brillants des mêmes substances. C'est dans l'une de ces géodes que j'ai reconnu l'axinite, avec ses faces nommées *l* et *s* par Haüy. On peut croire que l'acide borique a été introduit à la suite de l'éruption rocheuse, comme dans les amas métallifères du Sud-Ouest de la Norwège, où l'on a trouvé l'axinite[2].

Le granite, dont l'intrusion a contribué pour une large part à la constitution de la chaîne des Pyrénées, y a produit les mêmes phénomènes qu'a décrits Durocher et que M. Barrois a également reconnus dans les Asturies et la Galice, où la tourmaline est associée aux schistes mâclifères.

En Cornouailles, chaque îlot granitique est également entouré d'auréoles métamorphiques. De la Bèche les a parfaitement fait connaître dans son classique ouvrage sur cette presqu'île, et les a figurées d'une manière expressive sur sa carte, par une teinte dégradée autour de chaque protubérance. La tourmaline[3] figure parmi les minéraux qui ont été ainsi engendrés.

Des exemples non moins nets sont visibles dans le

[1] *Comptes Rendus*, t. XVIII, p. 870, 1844.
[2] *Annales des Mines*, 4e série, t. III.
[3] Allport. *Quarterly Journal*, 1870.

district des lacs du nord de l'Angleterre, autour du granite de Skiddaw. L'altération s'étend jusqu'à 3 à 4 kilomètres de la masse éruptive et plus près, se montrent des cristaux de chiastolite sur une largeur excédant rarement 400 mètres[1].

Le sud-ouest de l'Irlande, dans le comté de Wicklow, présente des effets très caractérisés de métamorphisme autour de masses granitiques, qui se développent du nord-est au sud-ouest sur une longueur de 100 kilomètres avec une largeur de 8 à 11 kilomètres.

Au Harz les roches enveloppant le granite, qui ont depuis longtemps reçu le nom de *hornfels*, décèlent des actions non moins significatives.

En Bavière, dans le Fichtelgebirge, aux États-Unis, dans le New-Hampshire[2] et dans bien d'autres lieux, il serait facile de signaler des faits analogues.

Les transformations dues aux intercalations de granite se sont propagées sur des distances variables qui, de quelques centaines de mètres, vont exceptionnellement à 1500, 2000 et 3000 mètres. Elles se sont généralement propagées plus loin dans les angles rentrants de la masse éruptive.

La chaleur seule ne peut expliquer ces faits, ainsi que Durocher l'avait reconnu. Le granite qui a pénétré à un état plastique nous apprend, par les inclusions que renferme encore sa pâte, que des gaz, des vapeurs, des liquides parmi lesquels l'eau se trouvait très probablement, ont dû accompagner sa sortie et contribué aux actions que nous venons de signaler.

[1] Ward. *Quarterly Journal*, t. XXXII, 1876.
[2] Hawes. *American journal*, 1881, t. XXI, p. 21.

CHAPITRE II

MÉTAMORPHISME RÉGIONAL

Métamorphisme de composition minéralogique.

Ce n'est pas seulement à proximité des roches éruptives que les roches stratifiées ont subi des modifications très notables.

Comme premières phases de ces modifications, nous en avons signalé plus haut qui se sont produites, sans qu'il y ait eu formation de nouvelles espèces minérales, comme étant le résultat d'un simple départ accompagné d'une cristallisation. Telles sont les veines calcaires des marbres et les veines quartzeuses des quartzites et des phyllades.

Mais il est aussi des changements plus avancés.

Des massifs considérables de roches sédimentaires, occupant des pays entiers, montrent un métamorphisme prononcé, lors même qu'il est impossible de découvrir au milieu de ces terrains le moindre affleurement de roches éruptives.

Cette modification est facile à constater dans les contrées où elle est assez peu intense pour n'avoir pas fait dispa-

raître le caractère sédimentaire de la roche, comme il arrive dans le pays de Galles, le Taunus et les Ardennes.

Dans ces contrées et d'autres de l'Europe occidentale sur lesquelles les études géologiques se sont portées d'abord, ce sont les terrains les plus anciens qui présentent des caractères cristallins de ce genre ; aussi a-t-on cru pendant longtemps que cet état minéralogique était l'apanage des dépôts sédimentaires formés à ces époques reculées. De là le nom de terrains de *transition* que leur avait donné Werner, supposant que dans la mer où ces roches s'étaient formées, à la suite des terrains primitifs ou cristallins, il continuait à s'opérer une précipitation chimique de silicates, en même temps que commençaient à s'y former des dépôts mécaniques.

Plus tard, on a reconnu qu'il n'en est pas ainsi et que cet état semi-cristallin résulte certainement d'une transformation postérieure à la sédimentation.

Sans insister ici sur la nature des divers changements qui se sont produits dans ces terrains, je me bornerai à remarquer qu'aux roches argileuses se sont substitués des phyllades. Ces roches, bien que consistant essentiellement comme les premières, en silicates d'alumine, en diffèrent tout d'abord par leur cohésion ; elles se refusent à se délayer dans l'eau, ainsi que chacun peut le constater sur les variétés employées sous le nom d'ardoises, pour couvrir les habitations.

Des combinaisons cristallisées diverses y ont en effet pris naissance ; Sauvage l'avait déjà clairement reconnu, il y a plus de quarante ans, à la suite de ses importantes recherches chimiques sur les phyllades des Ardennes[1]. C'est ce que l'examen microscopique a bien démontré à MM. Re-

[1] *Annales des Mines*, 4e série, t. VII, p. 411, 1845.

inférieurs à la réalité et ne représentaient que des *minima*.



Fig. 115. — Vue en plan de l'appareil précédent; même signification des lettres. La flèche indique le sens des mouvements. — Même échelle.

Cependant ils ont été très notables, même pour des temps très courts, comme le montre le résumé ci-après[1] :

Temps.	Nombre de tours de la roue.	Chemin parcouru.	Accroissement observé.
1 minute. . .	445	155^m	4°,5
10 secondes.. .	60	21	2°,0
5 secondes.. .	30	10,50	1°,7
3 secondes.. .	15	5,25	1°,5
1 seconde. . .	5	1,75	0°,6

Bien que ces résultats soient relatifs à des expériences distinctes, on les a rapprochés dans la figure 117. La courbe par laquelle on a tenté de les réunir présente une irrégularité qui s'explique notamment par la manière dont agit le refroidissement.

De l'argile sèche de Vaugirard qu'on a fait frotter sur le calcaire s'est également échauffée, quoiqu'une partie notable se réduisît en poussière. En augmentant le poids qui pressait sur le prisme d'argile, on a reconnu, comme on pouvait s'y attendre, que la chaleur produite augmente avec la pression.

[1] Ces essais ont été faits avec l'obligeant concours de M. Napoli.

produit le feuilleté dans l'argile qui enveloppait ces corps. C'est une coïncidence conforme à celle qu'avait signalée l'observation des faits géologiques. De plus, l'existence de vides, laissés entre les tronçons des bélemnites étirées artificiellement, ainsi que la conservation, par ces vides, de la forme du fossile, offrent, avec des échantillons naturels, une analogie significative; car ce double caractère prouve que l'étirement a eu lieu lorsque les roches rendues, il est vrai, plastiques par l'énergie de la pression, étaient cependant à l'état solide. Les expériences montrent, en effet, que dans une substance pâteuse les vides se déforment, et puis se comblent, au moins partiellement, par des bavures, au fur et à mesure de leur production.

D'un autre côté, l'expérience montre, comme on l'a vu plus haut, figure 98, page 223, que la schistosité peut se développer dans des masses à peu près solides, telles que le plomb. Il en a sans doute été de même pour des roches, comme celles du mont Lachat, qui ont été rendues schisteuses, en même temps que des bélemnites s'y étiraient.

La texture feuilletée peut se produire aussi par des procédés autres que celui qui vient d'être mentionné[1].

Le moyen qui se présente naturellement à l'esprit est analogue à celui par lequel on prépare les pâtisseries feuilletées[2]. Mais ce procédé ne paraît avoir que bien peu d'analogie avec les phénomènes naturels.

D'un autre côté, je dois rappeler que j'ai obtenu autrefois le feuilleté du verre transformé, dans mes expériences sur la formation d'espèces minérales dans l'eau suréchauffée.

[1] Je ne mentionnerai que pour mémoire le clivage que M. Fox a annoncé se produire dans l'argile, sous l'influence de courants voltaïques.

[2] On enduit de mica ou de graisse une couche d'argile, puis, en repliant cette couche un certain nombre de fois sur elle-même et en la laminant, on obtient une masse feuilletée, qui ressemble aux roches schisteuses naturelles et qui participe également de leurs propriétés, en ce qui concerne la conductibilité de la chaleur.

Il convient, sans doute, de tenir compte, dans le mode de formation de certaines roches schisteuses, de cette dernière manifestation, par épigénie ou métamorphisme, de la structure feuilletée.

Après avoir constaté expérimentalement avec quelle facilité se produisent le clivage et la foliation dans des masses imparfaitement solides qui s'écoulent sous de fortes pressions, et après avoir vu qu'il suffit, pour cela, d'un très faible déplacement relatif de leurs particules, on ne peut plus s'étonner de la diversité minéralogique des roches schisteuses, non plus que de l'abondance avec laquelle plusieurs d'entre elles se présentent dans l'écorce terrestre. Cette texture est d'ailleurs indépendante du mode de formation de la roche et de la cause de sa plasticité, que cette cause soit l'eau, comme dans les masses argileuses, ou la chaleur, comme dans les laves.

Un fait des plus fréquents est le passage graduel des roches massives à des roches feuilletées, de même composition minéralogique.

L'un des modes possibles d'un tel passage se voit dans la gorge de Breda près Allevard (Isère). Les couches du calcaire liasique y montrent des systèmes de joints très rapprochés, obliques à la stratification et représentant comme une ébauche du feuilleté (fig. 106 et 107). Sous l'influence des forces qui ont ouvert ces plans de division, beaucoup d'ammonites et de bélemnites se sont déformées ; d'autres de ces fossiles sont coupés par les plans de clivage.

Il n'est pas de contrée granitique qui n'offre de nombreux exemples de ces transitions d'une autre nature, qu'il s'agisse de granite proprement dit, de protogine ou de syénite. On l'a vu journellement dans le percement du Saint-Gothard. Or, l'expérience montre que des échantil-

lons de la même argile, à des états de dessiccation faiblement différents, étant soumis à la compression, fournissent des couches juxtaposées, les unes schisteuses, les autres dépourvues de ce caractère, qui contrastent entre elles. Cette influence du degré de plasticité, que j'avais reconnue

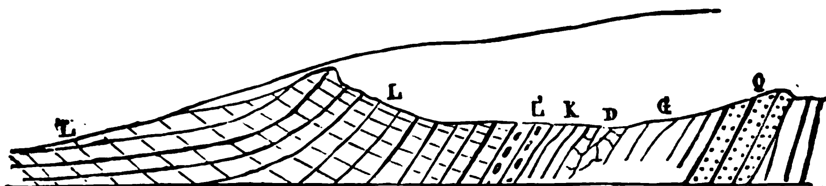


Fig. 106. — Profil géologique de la gorge de Breda, près Allevard (Isère), d'après M. Lory, montrant l'existence, à travers les couches calcaires du lias, d'un système de joints très rapprochés, obliques à la stratification et représentant comme une ébauche de feuilleté. — L, Calcaire noir liasique. — L', Calcaire noduleux attribué au lias, comme le précédent. — K, Calcaire noir attribué à l'infralias. — D, Dolomies, cargneules. — G, Couches de gypse. — Q, Grès quartzeux. — Schistes cristallins. — Échelle de $\frac{1}{5000}$.

dans mes premières expériences[1], rend compte des différences que l'on observe, dans un même massif de roches partiellement schisteuses.

Le mode de consistance de la pâte soumise à l'écoulement a une grande influence sur le degré plus ou moins net du

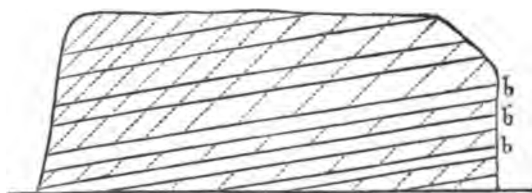


Fig. 107. — Coupe verticale donnant le détail des joints qui traversent, près d'Allevard, les couches calcaires du lias : b, b, b, petits bancs plus compacts, qui ne sont pas traversés par les joints. — Échelle de $\frac{1}{1000}$.

feuilleté. Cela paraît expliquer pourquoi les pâtes de nature argileuse ou marneuse ont joui d'un privilège à cet égard. Les calcaires et les quartzites, lorsqu'ils étaient mélangés

[1] *Études et Expériences synthétiques sur le Métamorphisme*, p. 112 du mém. in-4°.

d'argile, sont devenus schisteux (calcschistes de la Maurienne, quartzophyllades micacés).

En général, la schistosité se rattache, comme on vient de le voir, aux mouvements qui ont ployé les couches. Cependant il est des roches qui paraissent avoir pris une texture analogue à celle dont il vient d'être question, sans qu'elles aient cessé d'être horizontales. Tels sont notamment les schistes bitumineux du terrain permien (Igornay, près Autun, Thuringe, etc.) et peut-être aussi les bogheads tertiaires de Ménat (Puy-de-Dôme) et d'autres provenances, les marnes magnésiennes de Saint-Ouen, et certaines marnes du grès bigarré (Letten). Des roches qui avaient originairement une consistance très favorable au développement de la schistosité ont pu acquérir ce caractère, sous la simple pression des masses qui leur ont été superposées.

Il est des géologues qui ont regardé le feuilleté des roches cristallines, telles que le gneiss, comme un vestige de stratification, et qui ont assimilé les feuillets à des couches minces[1]. Cette supposition a servi à appuyer le nom de *métamorphiques*, qu'on a osé étendre à la totalité des roches de cette catégorie. Bien que j'aie cherché ailleurs à montrer l'importance du métamorphisme, je n'ai pas cessé de m'élever contre une conclusion hypothétique aussi absolue. Entre certains gneiss et le granite, il n'y a pas plus de distance qu'entre les laves feuilletées et les laves massives. L'observation qui précède suffit pour montrer combien il y a lieu, à plus forte raison, d'être circonspect dans les supputations, que l'on prétend faire, dans divers pays, des épaisseurs de ces roches.

Dans les terrains cristallisés dont il s'agit, la schistosité

[1] L'origine éruptive de certains gneiss et de leptynites a été soutenue par divers géologues, notamment par Naumann et par Élie de Beaumont. *Bull. Soc. géol.*, 2e série, t. IV, p. 130; 1847.

est très fréquemment parallèle aux plans qui séparent les roches de diverses natures, gneiss, micaschistes, calcaires, quartzites, c'est-à-dire aux plans de séparation de masses qui ont l'apparence de couches. Cette concordance, qui est ordinaire en Finlande, au Brésil et dans d'autres contrées, a été considérée, par Durocher, comme un effet direct d'une stratification antérieure, dans laquelle les paillettes de mica, en raison de leur tendance à se déposer à plat, marqueraient, par leur parallélisme, les plans de division des couches[1].

Cependant cette circonstance me paraît plutôt devoir s'expliquer autrement, soit que les minéraux cristallisés et interposés entre les feuillets fussent déjà formés lorsque la schistosité s'est produite, soit que ces minéraux aient cristallisé postérieurement et se soient disposés alors suivant les plans des feuillets. En effet, dans les terrains stratifiés et fossilifères, la schistosité est loin d'être toujours oblique à la stratification ; elle lui est souvent parallèle. On comprendra la fréquence de cette conformité, si l'on se reporte aux expériences précédentes et aux conditions d'écoulement qui produisent le feuilleté, notamment à l'expérience dans laquelle on voit une bélemnite, placée d'abord en travers, venir bientôt s'aligner parallèlement au jet.

C'est ainsi que des roches éruptives, subordonnées aux roches sédimentaires, si ces roches n'étaient pas tout à fait solidifiées, lors du mouvement qui a causé la schistosité, ont dû se feuilleter, parallèlement aux surfaces qui les limitent, et parallèlement aussi aux feuillets des roches sédimentaires voisines.

L'un des traits les plus remarquables des roches cristal-

[1] Études sur la structure géographique et la constitution géologique de la Norvège, de la Suède et de la Finlande. *Mém. Soc. géol. Fr.*, 2e sér., t. VI, p. 40, 1856.

lines, feldspathiques et amphiboliques, qui sont subordonnées aux terrains schisteux de l'Ardenne française, c'est que ces roches sont couchées parallèlement aux masses encaissantes, ardoises et autres. Non seulement elles n'y montrent pas les formes ordinaires aux injections plutoniques, mais encore elles présentent souvent une structure feuilletée, qui est parallèle à celle des masses voisines. De plus, la roche cristalline massive passe graduellement à la même roche, présentant l'état schistoïde.

Cette transition de l'un à l'autre type a été constatée par tous ceux qui ont étudié ces roches sur place. Aussi d'Omalius, dans de judicieuses observations, qui remontent à soixante-quinze ans, sur les roches feldspathiques des environs de Deville et de Laifour, leur donnait-il le nom d'*ardoises porphyriques*[1]. Le passage de l'une des textures à l'autre a été clairement constaté bien des fois depuis lors, et par exemple lors des réunions de la Société géologique de France, à Mézières, en 1835. « La pâte de la roche porphyroïde prend une structure de plus en plus schisteuse, en même temps que les cristaux de feldspath y deviennent de moins en moins abondants, et s'y arrondissent, probablement par l'effet d'une friction. Elle ressemble beaucoup alors à certaines roches des terrains ardoisiers et n'en diffère que par la présence du feldspath lamellaire[2]. »

Sauvage et Buvignier[3] ont comparé au gneiss ces variétés schisteuses, auxquelles Dumont[4] a donné le nom d'*hyalophyre schistoïde*. Ces mêmes variétés ont reçu le nom de *porphyroïde schistoïde*, de MM. de La Vallée-Poussin et Renard, qui, en diverses parties de leurs importantes études, insistent égale-

[1] *Journal des Mines*, t. XXIX, p. 55; 1811.
[2] *Bull. Soc. géol. Fr.*, 1re série, t. VI, p. 342; 1835.
[3] *Statistique minéralogique et géologique du dép. des Ardennes*, p. 121.
[4] *Mémoire sur les terrains ardennais et rhénan de l'Ardenne, du Rhin, du Brabant et du Condros*, 27.

ment sur ces passages[1]. Ces auteurs ajoutent que les amphibolites deviennent, de même, schistoïdes jusque dans le centre de leurs massifs.

Enfin, j'ajouterai que la collection du Muséum présente, dans les vitrines exposées au public, une série de ces roches cristallines schisteuses, recueillie par Cordier et provenant des environs de Deville, où j'ai eu également occasion de les étudier.

Ce que montrent les roches schisteuses cristallines des Ardennes trouve encore ses analogues dans bien d'autres contrées et pour d'autres roches. Comme on l'a dit plus haut, il n'y a guère de roches cristallines qui ne soient susceptibles de se présenter à l'état schistoïde. C'est ainsi que le granite, la protogine, la syénite, deviennent graduellement schisteux, dans une foule de localités.

Parmi les faits semblables que l'on pourrait citer en grand nombre, je me bornerai à rappeler d'autres cas problématiques, signalés dans des roches anciennes de la Belgique, ainsi que le passage complet du porphyre au schiste, signalé par M. de Dechen en Westphalie, dans la contrée de la Lenne. Les roches volcaniques récentes, particulièrement les trachytes et les phonolithes, offrent de toutes parts de tels passages.

Depuis que l'on a démontré expérimentalement les conditions mécaniques dans lesquelles une masse, incomplètement solidifiée, peut acquérir la structure schisteuse, sous l'influence d'un léger déplacement de ses particules, on ne saurait voir, dans la conformité de structure qui vient d'être signalée, une preuve de l'origine sédimentaire des roches cristallines et schistoïdes. Supposons que ces masses érup-

[1] Voir notamment p. 111 de leur Mémoire sur les roches plutoniennes de la Belgique et de l'Ardenne française.

tives aient été originairement subordonnées aux roches siluriennes et cambriennes, et interstratifiées dans ces dernières, par exemple, comme les nappes de porphyre feldspathique le sont dans les terrains permien et triasique de diverses contrées, ou comme le basalte l'est fréquemment dans les couches tertiaires : si ces masses éruptives n'étaient pas encore parfaitement solidifiées, lorsqu'un mouvement général a produit le feuilleté des roches argileuses dans lesquelles elles sont enclavées, elles ont dû participer à ce mouvement, et leur texture en a nécessairement subi la conséquence.

En résumé, le caractère schisteux a été imprimé très fréquemment aux roches éruptives, et souvent, en même temps qu'aux roches sédimentaires voisines, de manière à présenter un parallélisme général. On conçoit qu'un tel parallélisme puisse laisser dans le doute sur l'origine, éruptive ou sédimentaire, de certaines roches cristallines.

CHAPITRE III

OBSERVATIONS THÉORIQUES

D'après les faits qui ont été signalés plus haut et dans beaucoup d'autres cas, on reconnait que certaines espèces minérales, telles que les silicates, ne se sont produites dans la roche que postérieurement à sa formation. Il y a eu réellement métamorphisme sur des zones plus ou moins étendues.

C'est le métamorphisme régional qui mérite particulièrement de fixer l'attention. Le métamorphisme de juxtaposition n'en est qu'un cas particulier et en quelque sorte une réduction.

Les modifications dont il s'agit ont incontestablement eu lieu à une température plus élevée que celle qui règne maintenant à la surface du globe. On peut le conclure du seul fait des analogies minéralogiques de ces terrains avec les roches éruptives, et notamment de la présence de nombreux silicates anhydres qui forment un de leurs traits les plus remarquables.

§ 1. — CHALEUR INTERNE.

La chaleur propre du globe décroît nécessairement des profondeurs vers la surface, et par conséquent, des sédiments déposés dans l'Océan, à la température relativement basse qui règne généralement dans ses profondeurs, ont dû, quand ils ont été recouverts ensuite par d'autres couches, acquérir une température plus élevée, en raison de leur plus grand éloignement de la surface de rayonnement[1]. La superposition de remblais puissants, comme le sont certains terrains stratifiés, a pu souvent suffire pour déterminer le réchauffement notable des masses inférieures, postérieurement à leur dépôt, surtout aux époques où l'accroissement de la chaleur, selon la verticale, suivait une loi beaucoup plus rapide qu'aujourd'hui.

On peut ajouter une observation : actuellement que la température du fond d'une grande partie de l'Océan ne paraît pas être très supérieure à 0 degré, par ce fait seul qu'un dépôt sédimentaire serait mis à sec dans les régions tempérées, et que sa surface gagnerait par conséquent quelques degrés de température moyenne, tous les points situés sur une même verticale devraient également augmenter de température[2].

Ainsi la propagation régulière de la chaleur du globe a

[1] Cette remarque est due à Babbage, *Lond., Edinb. phil. mag.*, V, 213. Sir John Herschel a fait des observations sur les réactions chimiques qu'ont dû subir les terrains, par suite de cette élévation ultérieure de température. (*Leonhards Jahrbuch*, 1838 p. 98, et 1839, p. 347).

Le fond de la mer étant à une basse température, on ne pouvait admettre le réchauffement des couches sédimentaires dans les termes où l'avait indiqué Hutton.

[2] D'après la remarque de Sir John Herschel. Notice précitée.

pu agir sur des terrains entiers et y produire graduellement la transformation que nous avons désignée sous le nom de *métamorphisme régional.*

A part les effets de cette cause générale et en quelque sorte latente, il est des parties circonscrites où la chaleur s'est portée très près de la surface, notamment à la suite des roches éruptives. De là des centres particuliers, autour desquels la chaleur interne est venue produire le *métamorphisme accidentel* ou *de juxtaposition.*

§ 2. — CHALEUR DÉVELOPPÉE PAR DES ACTIONS MÉCANIQUES

Mais il est une autre cause plus immédiate et plus générale qui mérite toute l'attention.

L'un des caractères les plus remarquables des roches qui ont subi les transformations minéralogiques comprises sous le nom de métamorphisme, c'est que les roches, ainsi transformées, sont souvent associées entre elles, occupant ensemble des régions considérables, tandis que d'autres régions, plus étendues encore, ne présentent pas de modifications semblables. C'est ainsi que, dans les Alpes, les roches de tous les âges qui en font partie, carbonifères, triasiques, jurassiques, crétacées, éocènes, ont un faciès lithologique d'ancienneté, surprenant pour l'observateur qui en est, pour la première fois, témoin. Les Ardennes, le Taunus, le pays de Galles, présentent aussi des massifs entiers qui ont été transformés. Au contraire, en Russie et aux États-Unis, les terrains silurien et dévonien paraissent avoir à peu près conservé leurs caractères originaires.

De nombreux exemples ont appris que le métamorphisme régional s'est développé dans des pays dont les roches ont

subi des dislocations, tandis qu'il ne s'est guère produit dans les contrées, telles qu'une partie de l'Europe occidentale ou des États-Unis, dans lesquelles les couches ont à peu près conservé leur horizontalité première.

Les transformations dont il s'agit ont, selon toute vraisemblance, été engendrées sous l'influence d'une élévation de température. Aussi ce contraste a-t-il, en général, été attribué à cette circonstance, que l'écorce terrestre aurait reçu des émanations calorifiques plus considérables dans les portions fracturées, où elle devait être plus directement en rapport avec des exhalaisons chaudes qui sortaient des masses internes, lors même qu'on ne verrait pas d'intercalation de roches éruptives. C'est ce qui paraît encore avoir lieu aujourd'hui, par exemple pour certaines parties de la Toscane.

Tout en faisant une part aux émanations calorifiques et chimiques qui ont pu arriver des profondeurs du globe et jouer un rôle dans le métamorphisme régional, de même que dans le métamorphisme de juxtaposition, il est une cause plus immédiate et plus générale, qui me paraît devoir appeler l'attention : c'est la chaleur engendrée par les actions mécaniques mêmes, qui ont marqué leurs traces, dans ces massifs, par des ploiements et des contournements nombreux des couches, ainsi que par la schistosité.

En présence de l'énergie des poussées qui ont produit, de toutes parts, dans l'écorce terrestre, des déplacements relatifs, et, dans diverses roches, des mouvements intérieurs, on est frappé de l'énorme quantité de travail qui a dû être mis en jeu. On est porté à penser que tout ce travail n'a pas été transformé en effets purement mécaniques, et qu'une partie a pu être employée à échauffer les couches soumises à ses efforts. C'est, en effet, le propre des actions mécaniques de se partager, dans la plupart des cas, en deux

parties, l'une correspondant à des déformations, l'autre à des variations de température.

Partant de cette idée générale, Robert Mallet[1] a calculé la quantité de travail que produirait l'écrasement de roches, et il a cherché, ainsi, à rendre compte de la haute température des régions profondes qui sont le siège des volcans. Mais aucune mesure thermométrique n'avait été prise, pour justifier cette hypothèse, sur des parties du globe qui échappent d'ailleurs à notre investigation.

D'après les principes bien connus de thermodynamique, il m'a paru utile de rechercher, par des expériences directes, comment des actions mécaniques, telles que nous en constatons de si certains et de si nombreux vestiges dans l'écorce terrestre, ont pu engendrer des élévations de température dans les roches.

Ce qui importait surtout, c'était de rechercher les effets calorifiques produits par des *mouvements intérieurs*. Cependant j'ai tenté aussi d'observer ceux qui se produisent dans le *frottement mutuel* des roches.

Les expériences dont je vais rendre compte ont été faites au point de vue du géologue plutôt qu'à celui du physicien, qui mesure comparativement les quantités de travail et les calories correspondantes. J'en exposerai d'abord les résultats, puis je signalerai les déductions qu'on en peut tirer pour certains phénomènes géologiques, particulièrement pour le métamorphisme.

[1] *Transactions of the Royal Society*, p. 147; 1873.

Expériences.

Chaleur produite dans les roches par des mouvements intérieurs. — N'ayant plus à ma disposition les appareils puissants d'emboutissage, au moyen desquels j'avais précédemment fait des études sur la schistosité[1], j'ai dû avoir recours à d'autres procédés.

On a d'abord essayé d'aplatir des balles d'argile, en les lançant, au moyen d'un canon de fusil, contre une plaque fixe; ces balles étaient préservées de la chaleur des gaz de la poudre au moyen de bourres épaisses. Mais, au lieu de s'aplatir, elles se sont toujours réduites en une poussière très fine, dont on ne pouvait rien recueillir.

Je me proposais d'établir un appareil cylindrique, à double piston, dans l'intérieur duquel l'argile aurait reçu un mouvement de va-et-vient indéfini, lorsque je reconnus que plusieurs appareils employés dans l'industrie pourraient remplir le même but. J'ai pu en profiter, grâce à l'obligeance de MM. Boulet frères, constructeurs, et M. Lacroix, leur ingénieur, ainsi qu'à celle de MM. Tiphine, fabricants de briques, à qui je tiens à adresser ici l'expression de mes remerciements.

Les expériences qui suivent ont été faites, sauf une, sur des argiles fermes, dites *dures*, c'est-à-dire ne contenant que la moindre quantité d'eau possible pour être travaillées; à cause de leur cohésion, elles se trouvaient dans les conditions les plus favorables à un échauffement.

Écoulement sous la pression de cylindres unis et de cônes can-

[1] *Mémoires des Savants étrangers*, t. XVII; 1860.

nelés. — De l'argile ferme a été soumise à l'action de deux paires de cylindres lamineurs, ayant 0m,30 de diamètre, et mus par une machine à vapeur de 3 chevaux.

L'argile, après avoir passé successivement entre les deux paires de cylindres, dont la vitesse était, pour l'une de vingt-huit tours, pour l'autre de quatorze tours par minute, marquait un échauffement sensible au thermomètre, qui était de 0°,3 à 0°,4[1]. Il suffit donc pour cela d'un temps très court, de quatre secondes au plus, pendant lequel s'opère le laminage.

Deux cônes cannelés circulairement, à la manière des



Fig. 108. — Cônes cannelés employés à la préparation de la terre à briques, qui y est non-seulement laminée, mais aussi déchirée, à cause de la différence de vitesse des surfaces opposées l'une à l'autre. — Échelle de $\frac{1}{40}$.

cylindres servant à étirer le fer, ont leurs axes disposés parallèlement, de telle sorte que le plus petit diamètre de l'un soit placé en opposition du plus grand diamètre de l'autre (fig. 108). Par conséquent, à vitesse égale des axes, les circonférences opposées ont des vitesses différentes et font subir un déchirement énergique à l'argile, qui passe entre les cylindres, pendant leur mouvement. Des peignes-racleurs placés au-dessus des cônes lamineurs en détachent constam-

[1] Des thermomètres, enfoncés dans différentes parties de l'argile, servaient à en prendre la température.

ment l'argile, à mesure qu'elle a été laminée et déchirée. Comme ces racleurs ne sont pas en contact avec les cannelures, il reste toujours, à la surface de chaque cône, un enduit d'argile qui a $1^{mm},5$ d'épaisseur. Ainsi l'argile ne frotte que sur elle-même, ce qui est important, comme analogie avec le phénomène naturel.

En opérant sur 20 kilogrammes d'argile, on a constaté, au bout de quatre tours seulement, une augmentation de température de $3^{\circ},5$ à 4 degrés; or, à chaque tour, l'argile est déchirée et pressée pendant moins d'une seconde; l'augmentation de température ne correspond donc qu'à un travail d'environ quatre secondes. Si l'on continue à opérer sur la même argile, une buée, qui ne tarde pas à apparaître autour de l'argile adhérente aux cannelures, y décèle d'ailleurs, indépendamment de toute mesure, un accroissement de température.

Mouvement dans des tonneaux malaxeurs. — L'appareil connu sous le nom de *tonneau malaxeur*, et qui ressemble grossièrement au tonneau ou *tine* à mortier, permet de prolonger le mouvement beaucoup plus longtemps qu'on ne le fait avec les cylindres : aussi a-t-il produit des élévations de température incomparablement plus fortes.

Le tonneau de MM. Boulet, sur lequel j'ai expérimenté d'abord, est destiné à corroyer des argiles très fermes. Il consiste en une boîte cylindrique en fonte, placée verticalement et ouverte à sa partie supérieure, qui a $0^{m},75$ de diamètre sur $0^{m},80$ de hauteur. Un gros arbre en fer, également vertical, placé au milieu, reçoit un mouvement de rotation. Cet arbre est muni, sur une partie de sa hauteur, de deux systèmes de lames inclinées ou couteaux, qui servent à diviser la terre, tout en l'obligeant à descendre. Ce même arbre porte, à sa partie inférieure, deux roues à palettes, en

fer, superposées l'une à l'autre, qui, après avoir trituré la pâte et l'avoir fortement comprimée contre les parois, l'expulsent au dehors, par un orifice placé près du fond. L'argile n'est poussée hors du tonneau qu'après avoir fait plusieurs tours, dont le nombre dépend du degré de plasticité de l'ar-

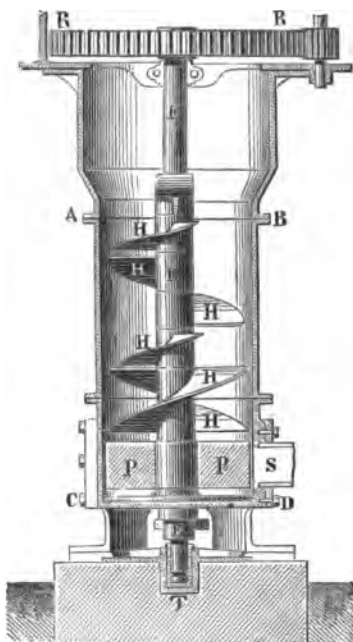


Fig. 109. — Tonneau malaxeur utilisé pour les expériences relatives au développement de chaleur dans les roches, par les actions mécaniques. A, B, C, D, section du cylindre destiné à recevoir l'argile à malaxer ; E, E, E, arbre vertical animé d'un mouvement autour de son axe; il porte une lame hélicoïdale H, H, H, qui force l'argile à descendre, pour subir l'action triturante; P, P, palettes courbes, qui triturent l'argile et la font frotter sur les deux couches, également argileuses, qui recouvrent, l'une les parois verticales, l'autre le fond du tonneau S, orifice ou buse, par où l'argile sort, après le malaxage. L'arbre tournant E, E, E est actionné par l'engrenage R, R, et est supporté par la crapaudine T. — Échelle de $\frac{1}{50}$.

gile. Ce tonneau malaxeur est mû par une machine à vapeur de 4 chevaux ; il a une contenance d'environ $\frac{1}{5}$ de mètre cube, et il peut élaborer 2 mètres cubes par heure, en faisant environ six tours par minute.

Un tonneau malaxeur, d'une disposition peu différente de

celui dont il vient d'être question, est représenté par les figures 109 et 110.

Pour préserver les parois métalliques du cylindre d'une usure rapide, les arêtes extrêmes des palettes en sont séparées par une distance de 3 centimètres : sur toute cette épaisseur il y a donc une couche permanente d'argile, contre laquelle frotte l'argile mise en mouvement. De plus, dans l'expérience dont il va être rendu compte, le fond du cylindre métallique était lui-même recouvert d'une couche d'argile, de 20 centimètres d'épaisseur. Par suite de cette double disposition, une condition essentielle se trouvait réalisée :



Fig. 110. — Vue, en projection horizontale, de la palette P, P, dont la tangente extrême fait un angle de 25 à 35 degrés avec l'élément voisin du cylindre. La flèche marque le sens du mouvement; E, projection horizontale de l'arbre moteur. — Même échelle que la figure précédente.

comme dans les cônes cannelés, l'argile ne frottait que contre elle-même, et sans aucune intervention des parois métalliques.

La pâte sur laquelle on a opéré d'abord est du limon de l'Escaut, que l'on emploie pour la fabrication des briques. Le tonneau étant en mouvement, on prenait, de dix minutes en dix minutes, la température des mottes qui en sortaient, puis, on les rejetait immédiatement dans le cylindre. La température de cette argile, qui était d'abord de 8°,5 (la température de l'air étant de 13 degrés), s'est constamment et régulièrement accrue pendant deux heures, au bout desquelles elle atteignait 29 degrés : il y avait donc une augmentation

de 21 degrés. D'après la forme régulière de la courbe qui représente les résultats de ces mesures (fig. 111), l'accroissement de température aurait continué, si l'on n'avait pas été forcé d'arrêter l'opération[1]. L'échauffement de l'argile n'a pas tardé à s'annoncer par la vapeur que l'on voyait s'en exhaler.

D'autres expériences ont été faites avec des tonneaux malaxeurs qui fonctionnent à l'usine de MM. Tiphine et qui diffèrent de ceux dont il vient d'être question, par la disposition des palettes : ils sont mus par une machine à vapeur de 6 chevaux. De même que dans le cas précédent, ce n'est pas contre les parois métalliques du cylindre, mais contre une couche d'argile de 3 centimètres d'épaisseur, que frotte l'argile mise en mouvement.

La pâte ferme, sur laquelle on a opéré, ne renfermait, outre son eau de carrière, qu'environ 30 litres d'eau par mètre cube, soit environ 3 pour 100 de son volume ou 2 pour 100 de son poids. Pour cette argile, l'arbre du tonneau fait 4,5 tours par minute, et le tonneau se vide dans l'espace d'environ sept minutes.

Dans une première expérience, pendant que la rotation s'opérait, la vanne d'écoulement était fermée et on l'ouvrait, de temps à autre, pour faire sortir un échantillon d'argile. La température initiale étant 17°,3, l'argile qui en a été expulsée, de cinq en cinq minutes, marquait les températures suivantes :

19°, 22°, 25°,3 27°, 28°,3.

On a ensuite malaxé la même argile, d'une manière continue, pendant vingt-cinq minutes, sans ouvrir la vanne;

[1] La machine devait être expédiée d'urgence à l'étranger.

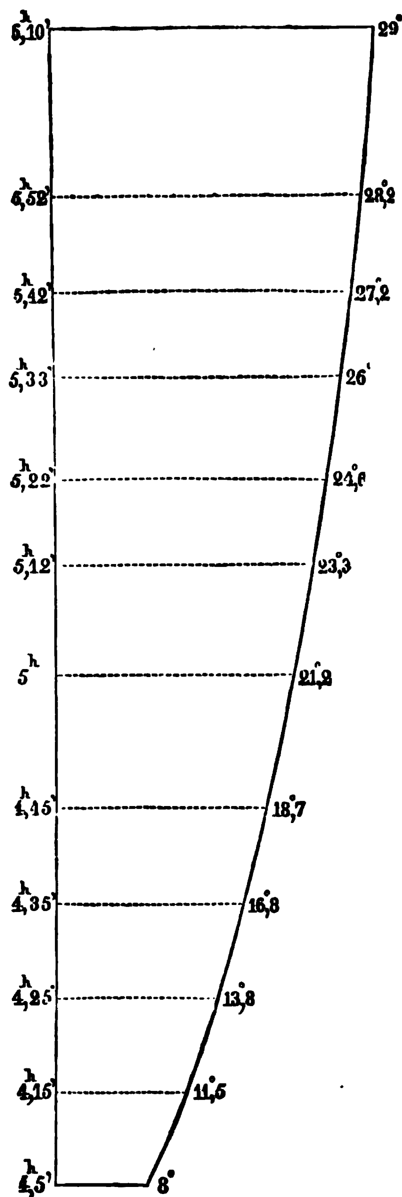


Fig. 111. — Courbe représentant les températures prises successivement par de l'argile *ferme* triturée sur elle-même, dans le tonneau malaxeur de MM. Boulet.

puis, on en a fait successivement sortir des morceaux, après

vingt-cinq, trente-cinq et quarante-cinq minutes de rotation. La température, étant de 18 degrés au commencement de l'expérience, était devenue :

Au bout de	25	minutes	36°,3
»	35	»	38°,8
»	45	»	40°,1

C'est ce qu'exprime la courbe fig. 112.

L'expérience a encore été reprise sur environ 140 kilogrammes d'argile, le tonneau restant fermé. La température, qui, au début de l'opération, était de 14 degrés, s'est élevée, au bout d'une heure, jusqu'à 44°,5, soit de plus de 30 degrés.

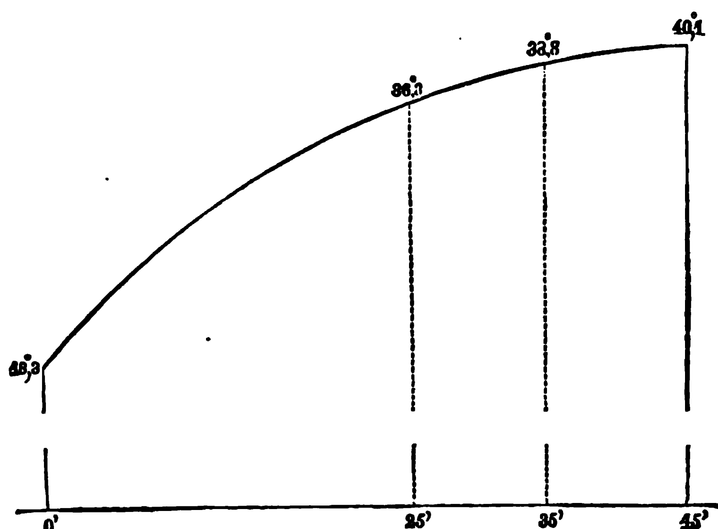


Fig. 112. — Courbes représentant les températures prises successivement par de l'argile *ferme* triturée sur elle-même, dans le tonneau malaxeur de MM. Tiphine.

Les courbes qui expriment les accroissements thermométriques mesurés s'élèvent moins rapidement vers la fin de l'opération, ce qui s'explique par les causes de refroidissement qui interviennent.

D'un autre côté, on a opéré dans un tonneau semblable,

non plus sur de l'argile ferme, mais sur de l'argile *molle :* c'était la pâte précédemment employée, à laquelle on avait ajouté environ 35 litres d'eau par mètre cube, c'est-à-dire à peu près autant que pour la première opération; la nouvelle pâte était ainsi devenue beaucoup plus plastique que la précédente[1].

La température, qui était d'abord de 12°,8, était arrivée, après dix minutes de rotation, à 13°,8; après vingt minutes, à 14°,2, c'est-à-dire qu'en vingt minutes cette température ne s'était accrue que d'environ 1°,4, tandis que dans les

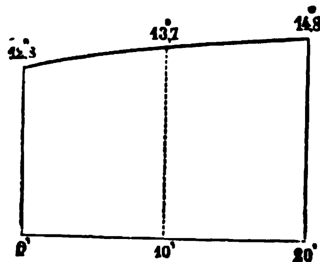


Fig. 113. — Courbe représentant les températures prises successivement par de l'argile *molle* triturée sur elle-même, dans le tonneau malaxeur de MM. Tiphine.

expériences précédentes la même argile, moins aqueuse, s'était échauffée de 15 degrés pendant le même temps.

La comparaison de ce dernier résultat, que représente la fig. 113, avec les précédents, montre combien le degré de consistance de l'argile a d'influence sur son échauffement. Toutes conditions égales, la masse s'échauffe beaucoup plus rapidement quand elle est maigre que lorsqu'elle est plastique; ce qui se comprend, à cause de la facilité avec laquelle, dans ce dernier cas, les particules, en quelque sorte lubrifiées, glissent les unes sur les autres. C'est un fait dont il convient de se souvenir, pour les déductions géologiques.

[1] Le tonneau faisait alors deux tours par minute.

Pour un même temps, l'élévation de température produite dans l'argile au moyen des cylindres lamineurs est beaucoup plus grande que celle que l'on obtient dans le tonneau malaxeur. Dans ce dernier cas, l'argile, après avoir subi une forte pression entre la palette et la paroi, s'échappe, au bout d'un temps très court, pour ne subir que des mouvements gyratoires. L'échauffement considérable de la masse est dû surtout à la durée de l'opération. On pourrait sans doute le rendre bien plus fort encore, si l'on augmentait la hauteur des palettes qui produisent la principale pression, hauteur qui, dans les machines employées, ne dépassait guère 1 décimètre.

Chaleur développée dans le frottement mutuel des roches. — Le frottement, qui cause une chaleur si sensible, lorsque deux métaux frottent l'un contre l'autre, produit, en général, des effets beaucoup moins marqués, quand il s'agit de roches. Comme c'est précisément le cas qui intéresse spécialement le géologue, il n'est pas inutile de rappeler quelques exemples d'effets calorifiques fort notables, que des opérations industrielles peuvent nous fournir.

Lorsque deux meules horizontales arrivent à frotter l'une contre l'autre, elles peuvent s'échauffer fortement, et, par suite, échauffer la farine au point de l'avarier. Cet effet se produisait surtout autrefois en Alsace, quand, antérieurement à l'emploi des meules de silex carié de la Ferté-sous-Jouarre, on employait celles de grès des Vosges, qui ne présentaient pas une taille aussi convenable à la circulation de l'air.

Dans l'opération préliminaire de la taille du diamant, connue sous le nom de *brutage*, où deux diamants sont soumis non seulement à un frottement, mais encore à un choc mutuel, la pierre s'échauffe assez pour ramollir le mastic qui

la porte, surtout lorsque l'opération, au lieu de se faire à la main, s'exécute sur la meule. En outre, lors du polissage, le diamant peut s'échauffer bien plus encore, et pour l'éviter on doit le tremper de temps à autre dans l'eau. On a vu le diamant noir ou *carbonado* devenir incandescent en travaillant, à sec, sur des roches quartzeuses.

Il est toujours difficile de mesurer rapidement de faibles variations de température, qui peuvent se produire sur un corps solide; cependant j'ai cherché à m'en rendre compte, surtout dans le but de constater l'influence de la pression.

Une plaque circulaire de marbre M, fig. 114 et 115, fixée

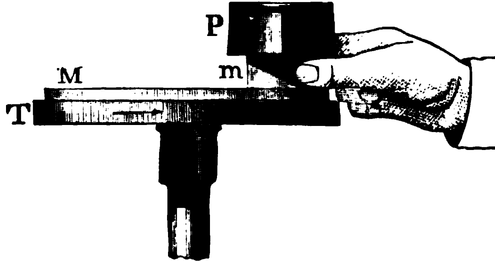


Fig. 114. — Appareil destiné à provoquer un développement de chaleur par le frottement mutuel de deux plaques de marbre. T, tour de lapidaire, à axe vertical, entraînant dans son mouvement, qu'on peut rendre plus ou moins rapide, une plaque circulaire de marbre M; m, autre plaque de marbre, maintenue immobile à la main et pressée sur la première, par le poids P, variable à volonté. — La flèche indique le sens du mouvement. — Échelle de $\frac{1}{4}$.

sur un tour de lapidaire à axe vertical T, recevait un mouvement de rotation très rapide. En même temps, on appuyait sur une petite partie de sa surface, non loin de sa circonférence, une autre plaque de marbre *m*, et de petite dimension, sur laquelle on avait appliqué un poids P, et que l'on maintenait immobile. Pour constater la température de la surface de la plaque immobile après qu'elle avait subi un frottement, on se servait d'un thermomètre à alcool, ayant un réservoir d'une grande capacité, dont le fond aplati, formé d'un verre mince, pouvait être appliqué sur cette plaque (fig. 116). Les accroissements, ainsi observés, devaient être

inférieurs à la réalité et ne représentaient que des *minima*.

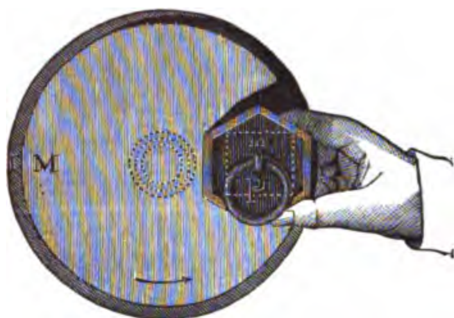


Fig. 115. — Vue en plan de l'appareil précédent; même signification des lettres. La flèche indique le sens des mouvements. — Même échelle.

Cependant ils ont été très notables, même pour des temps très courts, comme le montre le résumé ci-après[1] :

Temps.	Nombre de tours de la roue.	Chemin parcouru.	Accroissement observé.
1 minute. . .	445	155^m	4°,5
10 secondes. . .	60	21	2°,0
5 secondes. . .	30	10,50	1°,7
3 secondes. . .	15	5,25	1°,5
1 seconde. . .	5	1,75	0°,6

Bien que ces résultats soient relatifs à des expériences distinctes, on les a rapprochés dans la figure 117. La courbe par laquelle on a tenté de les réunir présente une irrégularité qui s'explique notamment par la manière dont agit le refroidissement.

De l'argile sèche de Vaugirard qu'on a fait frotter sur le calcaire s'est également échauffée, quoiqu'une partie notable se réduisît en poussière. En augmentant le poids qui pressait sur le prisme d'argile, on a reconnu, comme on pouvait s'y attendre, que la chaleur produite augmente avec la pression.

[1] Ces essais ont été faits avec l'obligeant concours de M. Napoli.

L'influence de la pression sur la chaleur produite peut d'ailleurs se constater dans maintes circonstances, par exemple quand on carbonise partiellement du bois, en le frottant



Fig. 116. — Thermomètre à fond plat, dont le réservoir est volumineux et la tige très fine, destiné à mesurer par application les températures successivement prises par la plaque de marbre m des deux figures précédentes. — Échelle de $\frac{1}{5}$.

sur lui-même, à la manière de ce que font certaines peuplades sauvages, dans le but d'allumer du feu.

Lorsqu'il y a choc, il suffit d'un instant très court pour

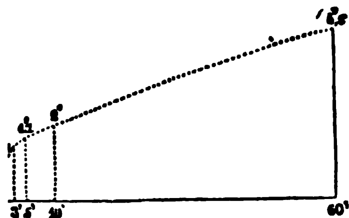


Fig. 117. — Tableau des températures prises, après des temps variant de 1 à 60 secondes, par une plaque de marbre pressée contre une autre plaque de marbre qui est animée d'un mouvement circulaire.

que la température s'élève beaucoup. C'est ainsi que, dans les expériences de Piobert et Morin sur le tir, les moellons calcaires, contre lesquels frappait le boulet, acqué-

raient, sur une faible épaisseur, d'après les auteurs des expériences, la saveur légèrement caustique de la chaux vive. Dans le choc de deux pierres, il se développe souvent assez de chaleur pour produire de la lumière et de la chaleur.

Déductions géologiques, particulièrement en ce qui concerne le métamorphisme.

Lorsque les couches ont subi les actions qui les ont infléchies, elles étaient à l'état solide, ainsi qu'on l'a rappelé plus haut. Mais, comme il n'existe aucun corps parfaitement rigide, ces roches, en même temps qu'elles se déformaient, paraissent avoir subi aussi des mouvements intérieurs, ayant une certaine analogie avec ceux dont nous venons d'étudier les effets dans l'argile.

Un des faits qui amènent à cette conclusion, c'est que beaucoup de ces roches ont acquis, dans ces mouvements, la structure feuilletée. Il ne s'agit pas seulement des argiles, mais aussi des calcaires et des quartzites qui sont si souvent schisteux, par exemple dans les Alpes. Les conditions dans lesquelles la structure schisteuse a pris naissance sont maintenant démontrées, non seulement par l'observation, mais aussi par l'expérience. On sait que cette structure décèle une certaine mobilité moléculaire, une sorte de malléabilité, dans les roches où elle a pris naissance, à la condition toutefois que celles-ci aient été soumises à des pressions suffisamment énergiques.

Sans qu'il y ait eu besoin de pressions considérables, on a pu, en malaxant l'argile pendant un temps très court, l'échauffer fort notablement. A plus forte raison, les mouvements naturels ont-ils pu élever, de même, la température

dans l'intérieur de roches moins plastiques, sous les pressions énormes qui étaient en jeu, et lors même que les déplacements moléculaires n'auraient eu que peu d'amplitude.

D'un autre côté, une faible élévation de température suffit déjà pour faire naître des réactions chimiques dans des masses, telles que les roches qui nous occupent. L'eau de carrière, dont toutes sont imprégnées, et celle qui y trouvait accès, favorisaient ces réactions, qui ont dû se prolonger un long laps de temps. C'est ce que démontre la production contemporaine de silicates cristallisés, de la famille des zéolithes, dans les briques romaines, à des températures qui quelquefois n'atteignaient pas 50 degrés[1].

L'expérience fait donc bien comprendre que certains effets du métamorphisme régional puissent simplement dériver de la chaleur, que des actions mécaniques ont provoquée dans les roches.

Dans l'étendue d'un même bassin houiller, le combustible présente souvent de grandes différences au point de vue de la proportion des matières volatiles qu'il renferme, et l'anthracite peut s'y rencontrer en même temps que la houille proprement dite.

Cette modification se fait souvent loin de toute roche éruptive apparente : c'est ainsi, comme on l'a vu plus haut, qu'elle se présente avec une netteté remarquable, dans les bassins de Mons et de Valenciennes, où la houille passe de l'état *gras* à l'état *demi-gras* et à l'état *maigre*, à mesure que l'on arrive à des faisceaux de couches plus profondes. La couche puissante du Creusot, dont la position est voisine de la verticale, de grasse qu'elle est vers l'affleurement, devient anthraciteuse dans la profondeur.

[1] Zéolithes formées par les eaux thermales de Luxeuil (Haute-Saône). *Bulletin de la Société géologique*, 2e série, t. XVIII, p. 108 ; 1860.

Mais ailleurs. des différences analogues se présentent dans des couches appartenant à un même niveau, et indépendamment de leur profondeur. Dans les monts Apalaches, d'après de nombreuses analyses rapprochées d'observations exactes sur le terrain, dont on est redevable aux frères Rogers[1], l'anthracite se montre dans la région orientale, où les roches sont le plus disloquées. A mesure qu'on s'avance vers l'ouest, la proportion de matière bitumineuse augmente très régulièrement, de telle sorte que la perte en matières volatiles se montre en rapport avec les plissements des couches. Ce contraste a été attribué, par ces savants, à de grandes quantités de vapeur et de matières gazeuses qui seraient sorties dans les régions fracturées. Mais quand on se reporte aux coupes qui montrent l'association de l'anthracite à des couches où les plis sont aussi prononcés et aussi rapprochés les uns des autres que dans les Alpes, et qu'on tient compte des expériences qui précèdent, il paraît très possible que, dans la région dont il s'agit, l'échauffement produit par les actions calorifiques soit intervenu, pour déterminer une sorte de distillation lente. On peut croire qu'il en est de même, et à plus forte raison, pour le combustible des Alpes, qui appartient au véritable terrain houiller et qui toujours consiste en anthracite.

Les roches pierreuses, quoique sans doute moins impressionnables par la chaleur que les dépôts charbonneux avec leurs principes volatils, présentent également des différences, selon qu'elles ont à peu près conservé leur position originelle ou qu'elles ont été fortement infléchies et contournées.

D'une part, ainsi qu'on l'a dit plus haut, page 194, dans les régions où les couches sont restées horizontales, les roches argileuses ne se présentent pas à l'état de véritables

[1] *American Geologist*, p. 433; 1843

phyllades, même dans les terrains très anciens, siluriens et autres. D'autre part, des phyllades bien caractérisés, et susceptibles, par exemple, d'être exploités comme ardoises, sont connus dans des terrains comparativement récents, à la condition toutefois que ces terrains aient été disloqués : tels sont ceux que l'on rencontre dans le terrain nummulique des Alpes, du Dauphiné (Saint-Jean-de-Maurienne) et de la Suisse (Glaris), ainsi que dans celui des Pyrénées.

La transformation d'argiles proprement dites en phyllades correspond à des modifications chimiques et minéralogiques fort remarquables. En général, des silicates alumineux nouveaux, le plus ordinairement hydratés, se sont formés entre les feuillets, où ils se trouvent à un état très confusément cristallisé, souvent comme des pellicules excessivement minces. Dans les phyllades des Ardennes, d'après d'anciennes analyses de Sauvage, il s'est formé un silicate du groupe de la chlorite. Ailleurs, c'est l'ottrélite, la séricite et d'autres combinaisons. Pour les schistes carbonifères de Petit-Cœur en Tarentaise, on a une idée des réactions qui s'y sont produites par le silicate en écailles cristallines qui est venu se déposer sur les empreintes des végétaux houillers.

Les schistes gris lustrés, qui occupent un si grand développement dans le Queyras, aux environs de Bardonèche et du mont Cenis, ainsi que sur le versant piémontais des Alpes, autour du mont Viso, et que l'on rapporte, malgré leur aspect cristallin, au terrain triasique, sont très remarquables à cet égard. Comme ils ont l'aspect et l'onctuosité du talc, on les a nommés talcschistes, pseudo-talcschistes, schistes calcaréo-talqueux ; mais, comme l'a montré M. Lory, leur faible teneur en magnésie prouve que ce n'est pas au talc qu'ils doivent ces caractères. D'un autre côté, il résulte d'une analyse que M. Terreil a bien voulu faire récemment sur ma

Voici les angles de ce quartz artificiel, donnés par les mesures que M. Hautefeuille a bien voulu en prendre :

	Quartz artificiel :	*Quartz, d'après M. Des Cloizeaux :*
e^2 sur e^2. .	120 environ	120
p sur e^2 . .	141°,41 à 141°,55	141°,47
p sur p.. .	94°,35′ à 94°,15	94°,15

Si, au lieu d'examiner, à un faible grossissement, les cristaux de quartz ainsi obtenus, on les soumet à un grossisse-



Fig. 140. — Cristal de quartz obtenu dans la décomposition du verre par l'eau suréchauffée. Il montre nettement deux faces plagièdres distinctes et toutes deux droites *x y*. — Grossissement de 120 diamètres.

ment d'environ 120 diamètres, on y distingue les facettes dissymétriques bien connues sous le nom de plagièdres. Sur



Fig. 141. — Cristal de quartz obtenu dans la décomposition du verre par l'eau suréchauffée. Il se distingue des deux précédents par la situation à gauche de la face plagièdre; il présente une série de stries appartenant à la même zone. — Grossissement de 120 diamètres.

les uns, les plagièdres sont *droits* (fig. 139); sur les autres, ils sont *gauches* (fig. 141); sur quelques échantillons on voit deux facettes tournées du même côté et d'inclinaison dif-

mées ou étirées et présentent une disposition ovale (fig. 118) : le rapport du grand au petit axe, lequel va du bord dorsal au bord ventral, varie souvent de 1,30 jusqu'à 1,60[1]. Il en est de même dans les calcaires d'Allevard, cités plus haut, page 232, à cause de la schistosité grossière qu'ils ont acquise.

J'ajouterai qu'une des ammonites du Moveran ayant été coupée en deux par le milieu, parallèlement à ses côtés, a été polie. M. Jannetaz, qui a bien voulu, sur ma prière, l'exa-

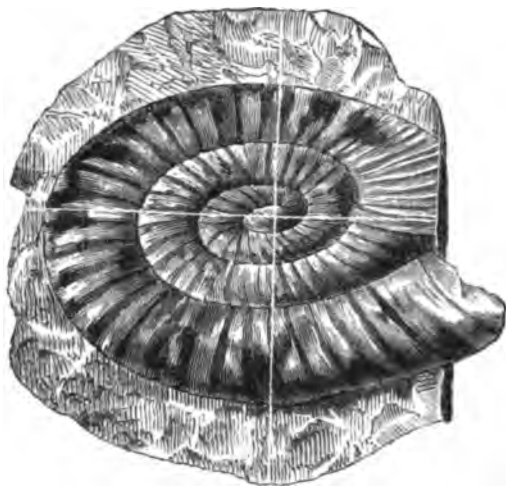


Fig. 118. — Ammonite déformée, des couches calcaires fortement redressées de l'étage oxfordien du grand Moveran. — Les deux lignes rectangulaires indiquent la direction des axes de conductibilité thermique maxima et minima. — Échelle de $\frac{1}{5}$.

miner au point de vue de la conductibilité de la chaleur, a reconnu que les ellipses d'égale conductibilité ont leur grand axe dirigé parallèlement à la direction de l'allongement relatif maximum (fig. 118).

D'après ce que l'on vient de constater expérimentalement sur les argiles, il ne me paraît guère douteux que les couches

[1] Ces déformations sont à distinguer de l'aplatissement suivant les côtés, qui est très fréquent et que peut expliquer la simple pression du poids des couches.

calcaires aient souvent éprouvé des mouvements intérieurs, assez énergiques pour acquérir ainsi une augmentation notable de température.

Le développement fréquent de la structure schisteuse dans les roches calcaires, qui ont été infléchies, conduit à la même conclusion. Entre autres exemples, je rappellerai les calcaires phylladifères et lustrés (souvent désignés sous le nom de cipolin), comme ceux qui sont si développés dans la Maurienne et dans la Tarentaise et qui sont attribués au terrain triasique, et les calcschistes de Sembrancher (Valais), employés sous forme de grandes plaques, dans une partie de la Suisse.

La rareté des fossiles dans les calcaires tourmentés des Alpes et autres contrées, est bien connue de tous les géologues, qui en retrouvent à grand'peine quelques débris. A part toute considération théorique sur le mode originel de dépôt de ces couches très épaisses, on conçoit que, dans les mouvements intérieurs, les fossiles n'aient pas été seulement déformés, mais aussi, qu'ils aient pu se triturer, au point de disparaître[1].

Non seulement le calcaire, ainsi corroyé, a pu changer de texture et prendre un état cristallin ; mais encore, en présence de l'élévation de la température qui s'y était produite, certains minéraux s'y sont développés. C'est ainsi que la présence si fréquente de l'albite, en petits cristaux très nets, qui sont disséminés, de toutes parts, dans les calcaires du trias et du terrain jurassique de la Savoie et du Dauphiné, ne peut s'expliquer sans une élévation générale de température dans ces massifs.

[1] Telle est aussi l'opinion à laquelle est arrivé M. Edward Hull, à la suite de ses études précitées sur les calcaires des environs de Cork, qui sont en couches contournées et qui contiennent des fossiles déformés *Journal of the geol. Society of Ireland*, t. XIV, p. 113, 1877).

Les quartzites, qui aussi sont très souvent devenues schisteux, donneraient lieu à des considérations analogues.

On a vu plus haut que, dans le malaxage, l'argile s'échauffe d'autant plus, à mouvement égal, qu'elle est plus dure, c'est-à-dire que les glissements moléculaires sont moins faciles et que le travail absorbé est plus considérable. D'après ce fait, on est autorisé à supposer que quand des roches, plus cohérentes que ces argiles, ont été soumises à des actions mécaniques assez puissantes pour y déterminer un certain mouvement intérieur, elles étaient dans des conditions encore plus favorables pour s'échauffer.

Dans les expériences au tonneau malaxeur, l'argile subit des mouvements gyratoires réitérés, tandis que dans beaucoup de cas naturels, lors des inflexions de couches, les mouvements peuvent avoir été plus simples et d'un moindre trajet. Mais il importe de se rappeler combien est grande l'influence de la pression sur la chaleur produite, et combien la force motrice employée dans les expériences qui précèdent est faible par rapport aux actions qui ont été mises en jeu dans les dislocations mécaniques de l'écorce du globe. Aussi paraît-il bien difficile de ne pas admettre que, dans ces dernières conditions, un déplacement, même très faible, dès qu'il a été suffisant, par exemple, pour provoquer une structure schisteuse dans des calcaires ou des quartzites, n'ait pas été accompagné d'une élévation notable de température.

A part les mouvements moléculaires qui se sont produits dans les roches, en raison d'une sorte de malléabilité, les couches ont dû fréquemment frotter les unes sur les autres, pendant qu'elles se déformaient. En dehors de toute considération géométrique, le fait est mis en évidence par les stries que présentent souvent leurs surfaces de jonction, dans les Alpes, dans le Jura et ailleurs ; surfaces qui, dans

quelques expériences, ont été également imitées avec leurs stries. Ces frottements étaient accompagnés de pressions énormes et par conséquent n'ont pu s'opérer sans produire aussi une certaine quantité de chaleur, lors même que le déplacement aurait été court et que les surfaces frottantes ne se seraient pas *émaillées*, comme il est souvent arrivé pour les parois des failles.

D'ailleurs, dans un même massif, certaines parties ont dû s'échauffer plus que d'autres.

En résumé, dans des massifs où le métamorphisme s'est développé sur de grandes dimensions et loin de l'apparition de toute roche éruptive, telles qu'en présentent bien des régions des Alpes, la chaleur qui a présidé à la transformation des roches et à l'apparition de nouvelles espèces minérales peut avoir été causée par les actions mécaniques mêmes que subissaient ces roches. La thermodynamique, qui a déjà jeté une si vive lumière sur divers phénomènes chimiques et physiques, devra porter aussi son flambeau dans la géologie.

§ 3. — INSUFFISANCE DE LA CHALEUR SEULE.

Toutefois, des raisons très puissantes font croire que ce n'est pas la chaleur seule qui a agi. Lors même que la température eût pu devenir assez haute dans les roches transformées pour en opérer le ramollissement, ce qui est le plus souvent tout à fait improbable, elle serait insuffisante pour rendre compte de la diversité des effets constatés. Les observations suivantes le prouvent.

Si la chaleur seule est cause des modifications qu'on observe dans des terrains dont la puissance dépasse souvent

mille mètres, comment cette action s'est-elle étendue sur une telle épaisseur? Pourquoi, au moins, n'est-elle pas, d'après les lois connues de la propagation de la chaleur et à raison de la faible conductibilité des roches, d'une énergie incomparablement moindre dans les parties éloignées que dans les parties voisines de la surface d'arrivée? C'est pourtant ce qui n'existe pas, et la grandeur, comme l'uniformité des effets produits dans des massifs montagneux entiers, est un phénomène des plus frappants. Souvent aussi dans le métamorphisme de juxtaposition, ce n'est pas toujours dans les parties les plus voisines du contact des roches éruptives que les effets ont été le plus énergiques.

De plus, si, laissant de côté les relations d'ensemble on passe aux faits de détails, on trouve encore, dans le mode d'agencement des minéraux des roches métamorphiques, une foule de circonstances d'association ou de gisement qui empêchent d'admettre pour ces minéraux une origine due à la chaleur seule.

Pour en citer un exemple, je rappellerai le fait si fréquent de la cristallisation de silicates alumineux, comme la chiastolite et la staurotide, au milieu de phyllades fossilifères, et celle du grenat, du pyroxène, du feldspath, orthose et albite, dans des calcaires également d'origine sédimentaire, qui souvent même ne sont pas sensiblement modifiés.

La chaleur, puis la cristallisation qui est la conséquence du refroidissement, peuvent, il est vrai, opérer des départs ou liquations entre des substances qui étaient primitivement dissoutes l'une dans l'autre; c'est ainsi que le carbone se sépare de la fonte, en cristaux, à l'état de graphite. Mais l'expérience directe ne nous montre rien d'analogue au développement, sous l'action de la chaleur, de cristaux isolés de grenat, de pyroxène, de feldspath, dans une

gangue calcaire, qui n'a pas même été ramollie, et qui, selon toutes les apparences, n'a été que très faiblement échauffée.

On conçoit que des actions lentes, comme la nature en emploie si souvent pour élaborer les produits minéraux, soient capables de bien des résultats que l'homme est impuissant à imiter; mais a-t-on le droit de chercher exclusivement dans la durée du temps et dans des causes vagues, pour ainsi dire occultes, des explications que rien d'ailleurs ne justifierait?

Un même minéral peut se trouver parfaitement isolé et cristallisé au milieu de matrices très différentes : la tourmaline, le mica, le feldspath, le grenat, l'épidote, par exemple, se présentent au milieu du quartz, souvent avec les mêmes caractères que dans le sein du calcaire ou de la dolomie. Cette indépendance des silicates à l'égard de leur gangue paraît aussi annoncer que les minéraux ne sont pas de simples produits de liquation, puisque des milieux aussi différents n'auraient pas sécrété des composés identiques.

Partout, d'ailleurs, on rencontre dans les roches métamorphiques des minéraux très inégalement fusibles, qui ont cristallisé dans un ordre de succession tout à fait opposé à celui qu'on aurait dû attendre, dans l'hypothèse en question, de leur rapport de fusibilité.

Des arguments de nature diverse s'opposent donc à ce qu'on admette qu'un métamorphisme, n'ayant pas d'autre cause que la chaleur, ait donné naissance, dans les roches qui l'ont subi, aux minéraux qu'on y rencontre, même quand ces minéraux ne paraissent pas contenir de corps simples, étrangers à la composition normale primitive. Mais combien cette conclusion est plus démonstrative quand on voit le changement d'état des roches coïncider visiblement avec l'introduction de corps tout spéciaux

qui, selon toute probabilité, n'ont pu venir s'y fixer qu'ultérieurement!

§ 4. — EXHALAISONS QUI, DANS CERTAINS CAS, ONT PU SERVIR D'AUXILIAIRES A LA CHALEUR.

Si la chaleur seule a été impuissante à produire les effets dont nous vonons de parler, son action, aidée de certains corps gazeux ou faciles à réduire en vapeur, pourra-t-elle suffire à leur explication?

C'est l'idée qui s'est naturellement présentée la première à l'esprit; car la nature montrait des vapeurs abondantes et à affinités énergiques, dans les exhalaisons des cratères des volcans ou de leurs laves encore incandescentes. Ces vapeurs et ces gaz sont des composés où dominent les corps éléctro-négatifs, que les anciens minéralogistes appelaient, comme par instinct, les *minéralisateurs*, savoir : le chlore, le soufre, le carbone; plus rarement le fluor et le bore.

L'acide carbonique, l'acide sulfhydrique, l'acide sulfurique même, ont pu réagir autrefois sur quelques roches d'une manière semblable à ce que l'on observe dans certaines masses de gypse et d'alunite qui se forment encore aujourd'hui en Toscane ou dans les roches voisines des volcans des Andes et de Java, qui, sous leur action, se réduisent en véritable boue.

La décomposition de vapeurs chlorurées forme également sous nos yeux, le fer oligiste, et a pu donner naissance autrefois dans beaucoup de gisements, à l'oxyde d'étain et à l'oxyde de titane, comme l'apprennent à la fois l'observation et l'expérience synthétique. C'est d'une manière analogue que la magnésie cristallisée ou périclase, en-

gagée dans les calcaires rejetés de la Somma, a peut-être été produite par la décomposition du chlorure de magnésium par le carbonate de chaux. Cette supposition, que rendait vraisemblable l'abondance des vapeurs chlorurées du volcan actuel, a été confirmée par l'expérience[1]. Il est remarquable de voir les mêmes corps, qui produisent la périclase aux dépens du calcaire, former, en dissolution et à une température moindre, de la dolomie.

Le rôle qu'ont joué les chlorures à de hautes températures, pour produire la cristallisation des minéraux, ressort d'ailleurs clairement des expériences de Manross, Forchhammer et Henri Deville.

Quant au fluor et au bore[2], j'ai fait voir depuis longtemps qu'ils paraissent avoir concouru à la formation de beaucoup d'amas stannifères[3]. Ils entrent, en effet, dans la constitution de silicates caractéristiques, comme la topaze et la tourmaline, qui y ont été certainement engendrés, en même temps que l'oxyde d'étain.

Ces conclusions sont également applicables à des roches dont l'origne métamorphique est due, selon toute vraisemblance, à des phénomènes analogues. Telle est la roche bien connue de Schneckenstein, en Saxe, où ces topazes et ces tourmalines paraissent être venues s'insinuer entre les feuillets du schiste, tout en cimentant, concurremment avec le quartz, les nombreux fragments dans lesquels ce

[1] *Géologie expérimentale*, p. 149.

[2] La présence du fluor, déjà reconnue dans diverses roches volcaniques modernes, a été constatée par M. Scacchi dans les fumerolles du Vésuve. Quant au bore, d'après les énormes quantités qui sortent des *soffioni* de la Toscane et les dépôts du cratère de Vulcano et de la Californie, on ne peut guère douter qu'il n'en existe dans beaucoup d'autres localités où il a passé inaperçu jusqu'à ce jour.

[3] Mémoire sur le gisement, la constitution et l'origine des amas de minerais d'étain. *Annales des Mines*, 3ᵉ série, t. XX, p. 65, 1841.

Recherches sur la production artificielle de l'oxyde d'étain, de l'oxyde de titane, etc. *Annales des mines*, 4ᵉ série, t. XVII, p. 129, 1849.

schiste avait été concassé. Il en est de même au Brésil, pour des terrains entiers, tels que les roches schisteuses où abonde la topaze dans la contrée de Villarica, et dans lesquelles l'or et le diamant se sont produits sur de vastes étendues, avec les mêmes minéraux caractéristiques. Ces terrains ne sont en quelque sorte qu'une accumulation, sur un grand espace, des gangues habituelles de l'oxyde d'étain.

Il reste d'ailleurs encore fixé dans le granite des quantités assez sensibles de fluor et même de bore, pour que l'on puisse admettre que cette roche a pu fournir, avant de se solidifier, des quantités notables de vapeurs où ces corps étaient en combinaisou.

Ces idées sur l'intervention du fluor et du bore, qui datent de plus d'un demi-siècle, ont encore acquis plus de valeur depuis que Henri Sainte-Claire Deville, M. Hautefeuille et d'autres savants, ont fait cristalliser une série de minéraux à l'aide de fluorures, et que, d'autre part, la présence du fluor et du bore a été constatée dans beaucoup d'eaux minérales, et même celle du premier dans l'eau de la mer.

En dehors des amas de minerai d'étain, l'étude de bien des gîtes métallifères décèle une concomitance et des analogies dans les actions qui les ont produites, ainsi que le métamorphisme des roches encaissantes.

Les gîtes de fer oligiste et de pyrite de Framont, dans les Vosges, qui, lors de leur exploitation, fournissaient aux minéralogistes de si élégants échantillons, se sont déposés sur la périphérie d'un promontoire porphyrique intercalé dans un calcaire de transition (fig. 119 et fig. 120).

Dans cette dernière roche et à ses dépens, il s'est formé du grenat et du pyroxène en masses assez considérables, qui sont en partie enchevêtrées dans les minerais.

Des faits du même genre sont bien connus dans le Banat. Une roche syénitique, en traversant le calcaire crétacé, y a

déterminé, sur une longueur de plus de 80 kilomètres, la formation d'une bande métamorphique encore plus large que celle de Predazzo et caractérisée par l'idocrase, la wollastonite et les zéolithes. Cette connexion est démontrée claire-

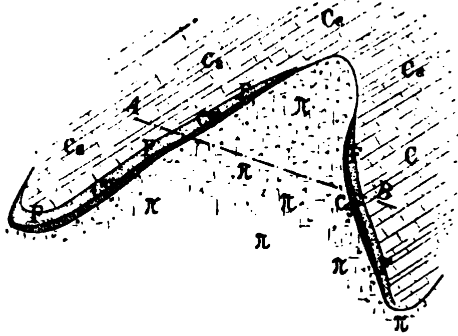


Fig. 119. — Juxtaposition des amas F, F, F d'oligiste et de pyrite de Framont (Vosges) à un promontoire porphyrique π. C, calcaire ancien, qui, à proximité du porphyre, s'est chargé de grenat et de pyroxène Cgr. — Échelle comme dans la figure suivante.

ment par les plans et coupes détaillés des gîtes de Dognaska et Moravitza, d'Oravitza, de Saska et de Neu-Moldova.

Les mêmes actions se sont à peu près reproduites à Rezbanya, qui est situé aussi dans le sud-est de la Hongrie, au



Fig. 120 — Coupe suivant la ligne AB de la figure précédente; même signification des lettres.

nord des gîtes précédents et dans leur alignement, comme l'a bien fait connaître Karl Peters[1]. Des roches trachytiques, andésites et autres, se sont intercalées dans des calcaires

[1] Geologische und mineralogische Studien, *Sitzungsbericht der k. k. Akademie, Wien.*, 1861.

jurassiques et néocomiens. Sur une partie de la périphérie de ces roches éruptives, dans la vallée Sacca (vallée sèche) (fig. 121 et 122), il s'est produit des gîtes de fer et de cuivre contenant de nombreuses espèces minérales, au nombre de plus de 60, parmi lesquelles se trouvent des sulfures, tellurures, séléniures, avec or, argent, cuivre, bismuth, fer, zinc, etc.; la présence du minéral nommé szalbelyite démontre que l'acide borique est intervenu. En même temps, dans

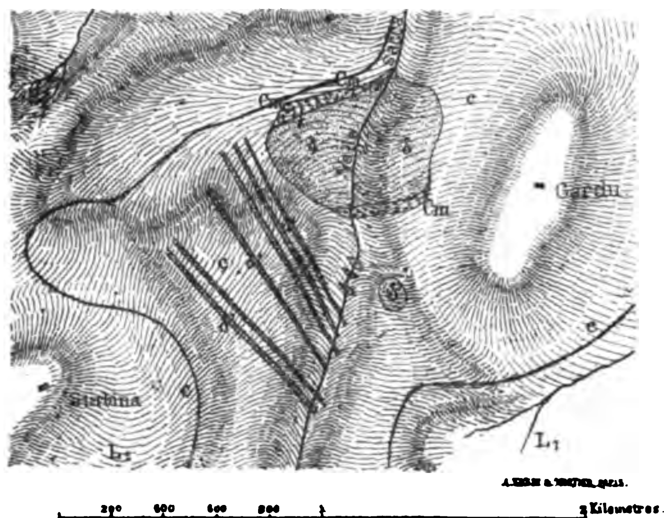


Fig. 121. — Carte géologique de la Valle Sacca, près Rezbanya, montrant comment sur une partie des flancs de la masse principale de la syénite δ, dont δ' δ' représentent des filons, il s'est formé des gîtes de contact Cm dans les calcaires jurassiques et crétacés C; L, grès du lias. — D'après M. Karl Peters.

les calcaires il s'est développé des silicates, notamment le grenat, l'idocrase, l'épidote et l'amphibole trémolite. L'auteur conclut que tout cet ensemble de faits est le produit d'infiltrations aqueuses, liquides ou en vapeurs, qui se sont épanchées dans les calcaires, comme il est arrivé lors de la formation du minerai pisolithique de la Haute-Carniole. Ces émanations ont été provoquées à la suite des éruptions de trachyte, de même que pour celles qui ont rempli

de nombreux filons dans les environs de Nagybanya et de Schemnitz.

L'association d'épanchements métallifères au développement de silicates dans les calcaires encaissants s'est produite en Toscane, à l'île d'Elbe, aux environs de Christiania et ailleurs. Les gîtes de cuivre de Turjinsk, dans l'Oural, encadrés dans des roches de grenat, sont devenus classiques depuis l'excellente description qu'en a donnée Gustave Rose.

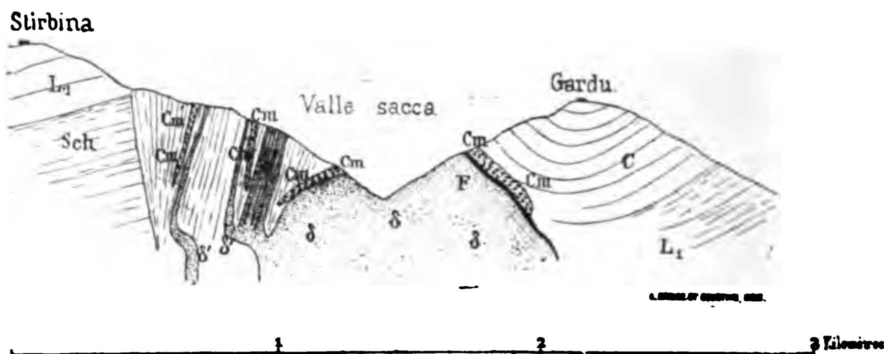


Fig. 122. — Coupe transversale de la Valle Sacca, près Rezbanya, montrant comment sur une partie des flancs de la masse principale de syénite δ, dont δ' δ' représentent des filons, il s'est formé des gîtes de contact Cm dans les calcaires jurassiques et crétacés C; L, grès du lias F, minerai de fer de contact. — D'après M. Karl Peters.

Ainsi, en unissant à l'action de la chaleur les auxiliaires dont je viens de parler, on explique un plus grand nombre de transformations que par la chaleur seule; mais, avec ces seuls agents, on ne peut se rendre compte de certaines circonstances très importantes qu'en attribuant aux vapeurs un rôle évidemment bien exagéré. C'est ce que Bischof et d'autres savants ont bien fait ressortir par de nombreuses considérations.

§ 5. — RÔLE DE L'EAU DANS LA PRODUCTION DU MÉTAMORPHISME.

Il est un corps qui n'a pas tout d'abord fixé l'attention, parce que sous l'empire des idées anciennes il semblait tout à fait inerte, surtout en présence des minéraux tels que le grenat ou le feldspath, dont il s'agit d'expliquer la formation, mais auquel pourtant le premier rôle paraît être dévolu dans les phénomènes métamorphiques, aussi bien que dans les éruptions des volcans : ce corps c'est l'eau.

L'eau abonde non seulement à la surface du globe, qu'elle couvre sur plus des trois quarts de sa superficie, mais aussi dans son écorce solide. D'abord, elle y circule de toutes parts, comme nous l'avons reconnu en étudiant le régime général des sources et des nappes souterraines. De plus, elle entre dans la constitution même de roches très répandues, telles que les argiles, c'est-à-dire qu'elle y est combinée chimiquement. Enfin les roches les plus compactes en retiennent entre leurs pores par l'action de la capillarité, comme l'atteste le mode de coloration artificielle des agates : c'est ce que l'on a appelé l'eau de carrière.

D'un autre côté, ce qui a été exposé précédemment, sur la formation des silicates hydratés ou zéolithes dans l'intérieur des bétons romains, n'intéresse pas seulement la formation de ces minéraux. Nous apprenons en effet par là comment l'eau, sans être à une température très élevée, peut faire naître des silicates bien définis et cristallisés, dans le tissu même de masses en apparence aussi réfractaires à son action que l'est la brique. Ces résultats positifs de l'expérience servent d'introduction lumineuse à la théorie du métamorphisme, dont ils reproduisent le fait le plus caractéristique.

Dans ces maçonneries romaines, il est vrai, il ne s'est formé que des silicates hydratés, tandis que dans les roches métamorphiques on rencontre très fréquemment des silicates anhydres, wernérite, grenat, pyroxène, albite, mica. Mais on pouvait croire que si une température d'environ 60 degrés suffisait à ces premières réactions, une chaleur plus considérable amènerait des résultats plus voisins de ceux que nous montre de toutes parts la nature, et qu'alors l'eau pourrait engendrer des silicates anhydres.

D'ailleurs l'association fréquente des zéolithes à certains silicates anhydres, tels que l'épidote, dans les cavités des roches amygdaloïdes ou dans les gîtes cuprifères du lac Supérieur, devait faire supposer que les uns et les autres ne différaient pas dans leur mode de formation, d'une manière profondément tranchée.

Les expériences suivantes dans l'eau suréchauffée qui ont été provoquées par ces inductions les ont pleinement confirmées.

§ 6. — EXPÉRIENCES SUR L'ACTION EXERCÉE PAR L'EAU SURÉCHAUFFÉE DANS LA FORMATION DES SILICATES.

Nous venons de voir comment on peut, à bon droit, soupçonner le concours de la chaleur, de l'eau et de la pression comme capables de produire les principaux phénomènes du métamorphisme. Il ne restait qu'à se placer dans des conditions aussi voisines que possible de celles dans lesquelles la nature paraît avoir agi, et à examiner si l'on obtiendrait la reproduction des minéraux caractéristiques.

Tel est le but d'une série d'expériences que j'ai entreprises et dont je vais rendre compte.

Procédé d'expérimentation. — En comptant même pour rien les dangers d'explosion qui sont souvent d'une violence tout à fait surprenante, les difficultés d'expérimentation m'ont empêché de multiplier ces résultats comme il eût été désirable ; cependant, les faits déjà reconnus sont concluants et montrent la fécondité de cette voie d'expérimentation.

La difficulté principale consiste à trouver des parois et des fermetures qui résistent assez longtemps à l'énorme tension acquise par la vapeur d'eau, quand la température s'élève vers le rouge sombre[1]. L'eau et les matières qui doivent réagir sont placées dans un tube en verre que l'on scelle ensuite. On introduit ce tube en verre dans un tube en fer, à parois très épaisses, qui est clos à la forge à l'une de ses extrémités (fig. 123). L'autre extrémité est souvent fermée

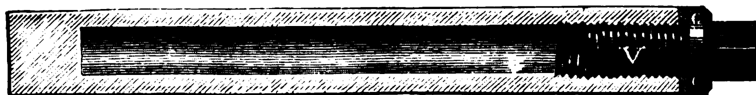


Fig. 123. — Tube en fer, employé aux expériences dans l'eau surchauffée. Section longitudinale montrant le bouchon à vis. V, au moyen duquel la fermeture hermétique est obtenue. C, Rondelle de cuivre. — Échelle de $\frac{1}{8}$.

au moyen d'un long bouchon à vis, muni d'une tête carrée qu'on peut serrer fortement en la tournant avec une clef, Entre la tête de la vis, qui doit être exécutée avec beaucoup de précision, et le rebord du tube, est placée une rondelle en cuivre bien pur ; elle est assez mince pour s'écraser, lors de la fermeture, par la pression du rebord, et s'incruster dans des rainures pratiquées à cet effet. Cependant, pour fermer la seconde extrémité, j'ai adopté plus tard, de préférence, un autre procédé : j'y rapportais à la forge un fort bouchon de fer F (fig. 124), qui arrive à faire corps avec le canon, si la soudure a été habilement opérée. Il faut, pour

[1] Il paraît hors de propos d'expliquer quels procédés j'ai tentés pour obtenir des fermetures autoclaves : je me borne à indiquer les fermetures hermétiques qui ont enfin réussi.

réussir, un ouvrier très adroit; car il est essentiel que la plus grande partie du canon reste froide, afin que l'eau intérieure, en se vaporisant, ne contrarie pas l'opération.



Fig. 124. — Autre mode de fermeture du tube de fer, obtenue par un bouchon uni et cylindrique F, soudé à la forge. — Échelle de $\frac{1}{5}$.

Pour contre-balancer, dans l'intérieur du tube de verre, la tension de la vapeur, qui pourrait le faire éclater, on verse de l'eau extérieurement à ce tube, entre ses parois et

A'

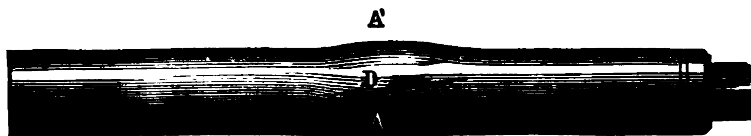


Fig. 125. — Résultat de l'explosion d'un tube à vis. — AA'. Ampoule. — D. Déchirure. Échelle de $\frac{1}{5}$.

celles du tube de fer qui lui sert d'enveloppe. De cette manière, l'effort principal est reporté sur ce dernier tube, qui présente beaucoup plus de résistance.

Ces appareils étaient couchés sur le dôme ou sur les car-

A'

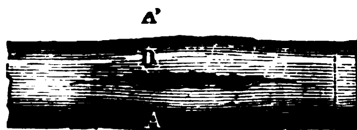


Fig. 126. — Résultats de l'explosion d'un tube fermé à la forge.— AA'. Ampoule.— D. Déchirure. Échelle de $\frac{1}{5}$.

neaux d'un four à cornues d'usine à gaz, en contact avec une maçonnerie au rouge sombre, et enfouis sous une couche épaisse de sable.

Des tubes d'un diamètre intérieur de 21 millimètres et d'une épaisseur de 11 millimètres, fabriqués avec du fer d'excellente qualité, font quel-

quefois explosion ; ils se déchirent suivant une de leurs génératrices en D (fig. 125 et 126), et sont alors projetés en l'air avec un bruit compa-

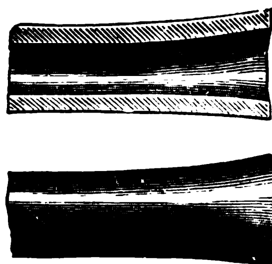


Fig. 127. — Aspect extérieur et coupe longitudinale de l'ampoule qui précède l'explosion du tube de fer employé aux expériences dans l'eau suréchauffée.

rable à celui d'un coup de canon. Si le fer n'avait point de défaut, et que l'on estimât qu'il conserve vers 400° la même ténacité qu'à froid,



Fig. 128. — Mode de fermeture d'un tube de cuivre rouge, construit pour l'exécution d'expériences dans l'eau suréchauffée. — Tc. Tube de cuivre très résistant. — Bc. Bouchon de cuivre fermant à vis. — F. Bride de fer. — V. Vis de pression. — Échelle de $\frac{1}{8}$.



Fig. 129. — Coupe longitudinale de l'apparei même signification des lettres que dans figure précédente.

de telles déchirures supposeraient une pression intérieure de plus de 1000 atmosphères.

Il est à remarquer qu'avant d'éclater, le tube se bombe sous forme d'une ampoule A, de 5 à 6 centimètres de longueur (fig. 125, 126 et 127), et c'est au milieu de cette ampoule que s'ouvre la boutonnière D (fig. 125

et 126), de façon à rappeler tout à fait le relief de la gibbosité de l'Etna, avec l'échancrure centrale du Val del Bove, dont l'origine a été attribuée par de Buch et Elie de Beaumont à une force expansive du même genre.

Un thermomètre à mercure, plongé dans le sable à proximité des tubes, y atteint rapidement sa limite; des fragments anguleux de zinc s'y ramollissent; la température à laquelle les tubes restent exposés pendant plusieurs semaines est donc au moins de 400 degrés. On les retire graduellement afin de les refroidir avec beaucoup de lenteur.

Un tube en cuivre rouge (fig. 128, 129, 130 et 131), avec un couvercle à vis également en cuivre rouge, que maintient



Fig. 130. — Vue en dessus de l'appareil ; même signification des lettres.

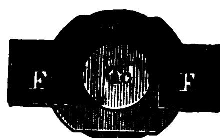


Fig. 131. — Vue en dessous de l'appareil ; même signification des lettres.

solidement une bride en fer F, munie de vis, a été construit pour continuer les expériences ; il n'a pas encore été utilisé.

Principaux résultats des expériences — A une température qui est au-dessous du rouge naissant, l'eau réagit très énergiquement sur certains silicates.

Transformation du verre en un silicate hydraté, avec production de quartz cristallisé. — Le verre ordinaire donne, au bout de quelques jours, deux et souvent trois produits distincts :

1° Une masse blanche tout à fait opaque qui résulte d'une transformation complète : elle est poreuse, happant à la langue et aurait l'aspect du kaolin, si elle ne présentait une structure fibreuse très prononcée.

La simple comparaison des épaisseurs d'un tube de verre, avant et après sa décomposition, annonce que, dans cette dernière action, la substance s'est considérablement gonflée. C'est ce que confirme l'examen des densités. Réduit en pou-

dre fine, le verre, modifié, a en effet, une densité de 2,49, c'est-à-dire très voisine de celle du verre ordinaire; mais les fragments de la même substance, pris avec leur volume apparent, ont seulement une densité de 1,89. La substance

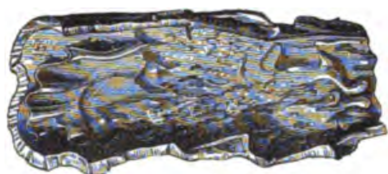


Fig. 132. — Résultats de l'action de l'eau surchauffée sur un tube de verre, à la surface intérieure duquel il s'est formé une série d'ampoules de formes diverses. — Grandeur naturelle.

est donc devenue poreuse et son volume apparent surpasse son volume réel environ du tiers de ce dernier.

Tantôt le tube, en se gonflant, a conservé sa forme générale; tantôt il s'est séparé en fragments fortement infléchis; tantôt il s'est couvert d'ampoules (fig. 132); tantôt il présente des excoriations à sa surface; tantôt il s'est gauchi et



Fig. 133. — Résultat de l'action de l'eau surchauffée sur un tube de verre cylindrique avant l'expérience; il est gauchi et gercé. — Grandeur naturelle.

gercé (fig. 133); tantôt enfin, il s'est tout à fait désagrégé et réduit en une poussière blanchâtre.

D'un autre côté, dans sa transformation, le verre a généralement acquis une structure éminemment schisteuse

(fig. 136). Les feuillets dans lesquels il se clive facilement sont de forme cylindroïde, comme le tube lui-même, et enroulés concentriquement (fig. 134); ils sont si minces qu'on peut quelquefois en distinguer plus de dix dans un millimètre d'épaisseur (fig. 135). Quand le verre est incom-

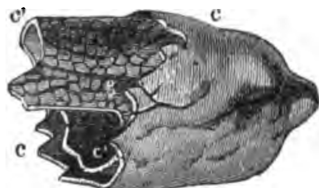


Fig. 134. — Résultat de l'action de l'eau suréchauffée sur l'extrémité d'un tube en verre, qui s'est divisé en couches concentriques *c*, *c'*. L'une d'elles présente des gerçures de retrait. — Grandeur naturelle.

plètement attaqué, le centre, quoique vitreux encore, montre aussi des zones très fines, comme les agates onyx (fig. 136). Le tout rappelle la structure de certaines roches schisteuses et cristallines.

En tous cas, la modification du verre, dont il est ici ques-



Fig. 135. — Résultat de l'action de l'eau suréchauffée sur un tube de verre qui s'est divisé en feuillets concentriques *c*, *c'*, *c''*, *c'''*, dont les plus minces *c'''* se sont enroulés à la manière d'une feuille de papier. — Grandeur naturelle.

tion est complétement différente de la dévitrification qui a été étudiée par Réaumur et, et plus tard, par Dumas et par Pelouze [1].

Le verre modifié dont nous nous occupons est facilement

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1855, t. LX, p. 1321 et 1327.

fusible ; il fond en bouillonnant, à la manière des zéolithes : car il s'est hydraté. Il est attaqué par les acides, même à froid. Sa composition a été trouvée, comme il suit, après un lavage à l'eau bouillante qui en a séparé des parties solubles, une dessiccation à 100 degrés, et déduction faite d'un résidu inattaquable, dont il sera question plus loin :

Silice	64,5
Chaux	21,9
Magnésie	1,2
Soude	6,5
Alumine	1,4
Eau	4,2
	99,5

La composition du verre primitif a été trouvée ;

Silice	68,4
Chaux	12,0
Magnésie	0,5
Soude	14,7
Alumine	4,9
	100,5

Pour mieux comparer la composition de ces deux silicates, on peut en rapporter les éléments à la même quantité de chaux :

	Verre ordinaire.	Verre décomposé.
Chaux	100,0	100,0
Silice	525,0	294,0
Soude	343,0	122,0
Magnésie	2,4	2,7
Alumine	40,0	6,1
Eau	»	195,0
	1060,4	719,2

En rapprochant ces deux séries de chiffres, on voit que le verre a perdu environ moitié de la silice et un tiers de l'alcali, et que le nouveau silicate a fixé de l'eau. La quantité d'eau indiquée par l'analyse des échantillons est sans doute inférieure à celle qui avait été fixée d'abord; car le tube de fer ayant été, par accident, mis à sec, la substance a été soumise, sous la simple pression atmosphérique, à une assez forte chaleur pour se déshydrater en partie. Quant à l'alumine, elle ne reste pas fixée, comme il arrive dans la décomposition ordinaire des silicates en présence des agents atmosphériques, d'après les belles recherches d'Ebelmen. A la faveur de l'alcali, l'alumine est en partie entraînée à l'état de dissolution, avec la silice.

Le silicate résultant de la transformation du verre a de l'analogie avec la pectolite, qui se présente aussi en cristaux ou en masses fibreuses.

Ainsi, l'eau pure et convenablement suréchauffée transforme un silicate anhydre, tel que le verre, en un silicate hydraté, de nature zéolithique.

Le verre transformé présente plusieurs variétés d'aspect, qui résultent non seulement des différences originelles des tubes, mais encore de la nature de la substance qui a été ajoutée à l'eau suréchauffée dans chaque expérience, ainsi que du temps plus ou moins long, pendant lequel l'action chimique a duré. On peut y distinguer au moins une variété friable, ressemblant à du kaolin, et une variété dure, beaucoup plus cohérente.

Dans la variété friable, la structure en couches concentriques adhérentes et la structure fibreuse se manifestent simultanément; on le constate à l'œil nu, ainsi qu'au microscope.

De plus, la paroi interne en est parfois revêtue d'une croûte transparente, hyaline, incolore, rayant le verre,

infusible et agissant très vivement sur la lumière polarisée ; c'est un dépôt de quartz cristallisé que l'on reconnaît très bien à l'œil nu (fig. 136) ; il est représenté également sur la coupe microscopique (fig. 146).

Le verre transformé, de la variété dure, présente des couches concentriques de nuances variées rappelant certaines agates-onyx (fig. 137). De même que dans le cas précédent, il s'y est développé des fibres normales aux surfaces.

2° Dans la décomposition du verre, dont le résidu fixe vient d'être décrit, du silicate alcalin s'est dissous en entraî-

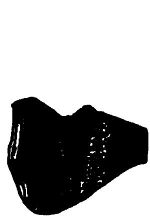


Fig. 136. — Résultat de l'action de l'eau surchauffée sur un tube de verre, à la surface intérieure duquel il s'est appliqué une incrustation q de quartz cristallisé. — Grandeur naturelle.

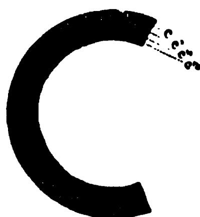


Fig. 137. — Résultat de l'action de l'eau surchauffée sur un tube de verre, dans la cassure transversale duquel se montrent plusieurs couches minces et concentriques c, c', c'', c''', reconnaissables à leur différence de couleur. La texture fibreuse y est parfaitement reconnaissable à l'œil nu. — Grandeur naturelle.

nant de l'alumine. Dans une expérience, la partie soluble a donné sur 100 parties : silice 37, soude 63.

L'égalité entre les quantités d'oxygène de la silice et de l'alcali conduit à la formule $NaO.SiO^2$ ou $Na\,Si$. On voit que ce composé est beaucoup plus basique que le silicate $Na\,Si^2$, qui, d'après les recherches de Pelouze, se dissout à froid. La différence, peut-être, vient de ce que le silicate alcalin, d'abord enlevé au verre, se décompose par une action de la chaleur comparable à celle que M. Fremy a constatée[1] ; le quartz cristallisé paraît, en effet, résulter d'une décom-

[1] *Comptes rendus de l'Académie*, 1856, t. XLIII, p. 1146.

position de ce genre, qui se fait peut-être à une température assez voisine de celle de la dissolution.

3° Il se développe le plus souvent d'innombrables cristaux incolores, d'une limpidité parfaite, qui offrent la forme ordinaire bipyramidée du quartz et qui, en effet, ne sont

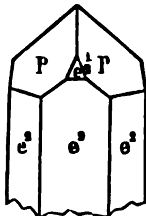


Fig. 138. — Cristal de quartz obtenu dans la décomposition du verre par l'eau suréchauffée; les faces du rhomboèdre primitif *p* sont beaucoup plus développées que celles du rhomboèdre $e\ \frac{1}{2}$. — Grossissement de 80 diamètres.

autres que de la silice cristallisée. Certains cristaux ainsi formés atteignent 2 millimètres au bout d'un mois.

Les faces d'un des deux rhomboèdres prédominent ordinairement beaucoup, comme l'indiquent les figures 138, 139,



Fig. 139. — Cristal de quartz obtenu dans la décomposition du verre par l'eau suréchauffée. Le rhomboèdre primitif y prédomine considérablement; de plus, il présente une face plagièdre droite, accompagnée d'une série de stries appartenant à la même zone. — Grossissement de 120 diamètres.

140 et 141 ; c'est ce qui se voit aussi dans la nature, par exemple, sur les améthystes du Brésil : sur certains individus, on voit même les seules faces de ce rhomboèdre. De même que dans les cristaux naturels, le prisme est cannelé par des facettes, perpendiculairement à la hauteur.

Voici les angles de ce quartz artificiel, donnés par les mesures que M. Hautefeuille a bien voulu en prendre :

	Quartz artificiel :	*Quartz, d'après M. Des Cloizeaux :*
e^2 sur e^2. .	120 environ	120
p sur e^2 . .	141°,41 à 141°,55	141°,47
p sur p.. .	94°,35' à 94°,13	94°,15

Si, au lieu d'examiner, à un faible grossissement, les cristaux de quartz ainsi obtenus, on les soumet à un grossissement d'environ 120 diamètres, on y distingue les facettes dissymétriques bien connues sous le nom de plagièdres. Sur

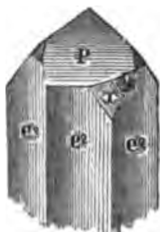


Fig. 140. — Cristal de quartz obtenu dans la décomposition du verre par l'eau suréchauffée. Il montre nettement deux faces plagièdres distinctes et toutes deux droites *x y*. — Grossissement de 120 diamètres.



Fig. 141. — Cristal de quartz obtenu dans la décomposition du verre par l'eau suréchauffée. Il se distingue des deux précédents par la situation à gauche de la face plagièdre; il présente une série de stries appartenant à la même zone. — Grossissement de 120 diamètres.

les uns, les plagièdres sont *droits* (fig. 139); sur les autres, ils sont *gauches* (fig. 141); sur quelques échantillons on voit deux facettes tournées du même côté et d'inclinaison dif-

férente (fig. 140). Des stries parallèles se montrent dans les zones des plagièdres.

Ce caractère cristallographique très remarquable, qui appartient surtout au quartz de certains gisements bien connus des minéralogistes, dans les Alpes, au Brésil, etc., n'a pas été signalé dans les cristaux antérieurement obtenus. Il est possible que ce trait de ressemblance entre les cristaux na-

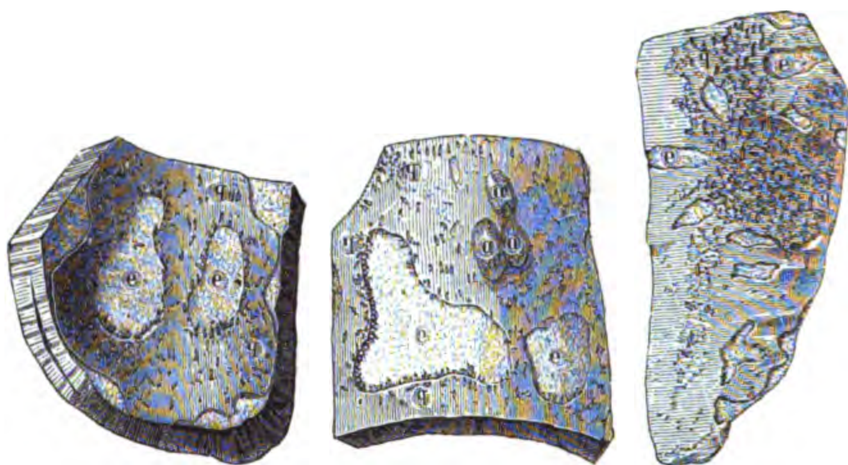


Fig. 142, 143 et 144. — Cristaux de quartz implantés et comme piqués sur les parois de tubes de verre soumis à l'action de l'eau suréchauffée, et formant, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur, des géodes et des druses. — *q*, cristaux de quartz isolés ; *a*, ampoules ; *e*, excoriations. Dans la fig. 142, on voit sur la tranche du verre la structure à la fois fibreuse et concentrique du verre transformé. — Grossissement : 2 à 1.

turels et les cristaux artificiels corresponde à une certaine similitude dans le mode de formation.

Tantôt les cristaux de quartz sont isolés dans la pâte opaque ; tantôt ils sont implantés sur les parois du tube primitif (fig. 136, 142, 143, 144 et 148), ils y forment de véritables géodes et des druses, qu'il serait de toute impossibilité de distinguer, à la dimension près, de celles que les roches cristallines et métamorphiques présentent si fréquemment.

Soumis à un acide, le verre transformé se désagrège ; on en isole ainsi : 1° des globules à peu près opaques ; 2° des

cristaux aciculaires transparents, infusibles, agissant sur la lumière polarisée, et quelquefois groupés en faisceaux.

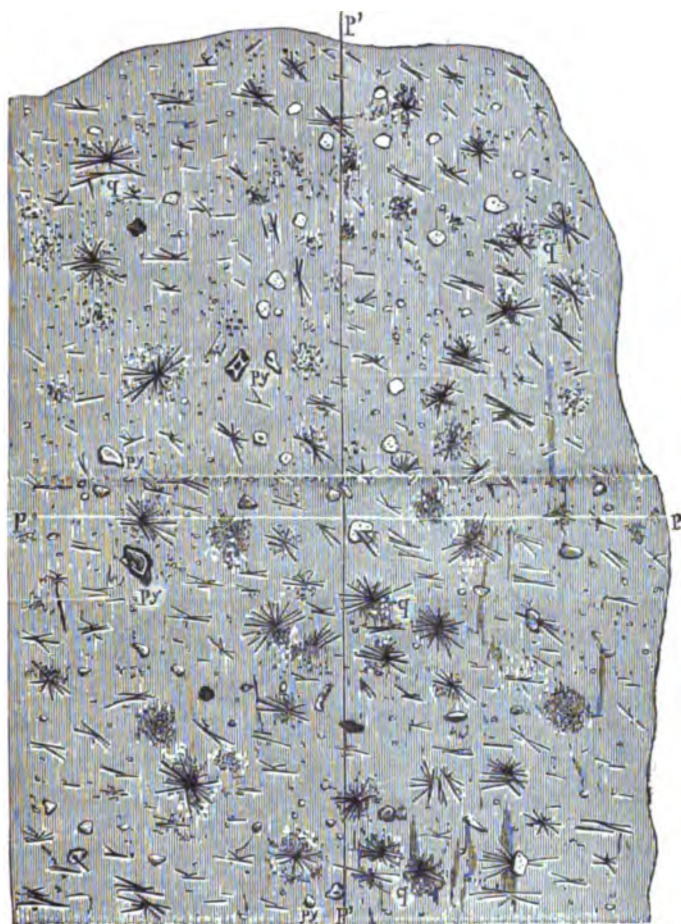


Fig. 145. — Verre transformé; plaque mince observée à la lumière polarisée et montrant : 1° Une série de petits cristaux incolores (microlithes), la plupart avec une disposition rayonnée, quelques-uns isolés *q*; 2° des cristaux verdâtres de pyroxène *py*. On y voit en outre des globules qui correspondent peut-être à ceux qu'isole l'acide. — *pp, p'p'*, plans de polarisation principaux des nicols. — Grossissement 180 diamètres.

Ces globules et ces aiguilles résistent à l'action de l'acide concentré et bouillant. Cette analyse immédiate concorde avec le résultat de l'examen microscopique dont il va être

pagnons de la houille. Les amas de sel gemme qui se montrent fréquemment dans le trias sont, en général, enclavés dans des argiles ou des marnes, auxquelles ils doivent leur préservation contre l'infiltration des eaux. Dans le terrain jurassique, divers étages d'argiles ou de marnes alternent avec les calcaires. Il en est de même dans le terrain crétacé, où l'on en exploite de très estimées, ainsi que dans les terrains tertiaires. Beaucoup d'argiles utiles se rencontrent aussi dans les terrains de transport.

On avait autrefois considéré les argiles comme le résultat de la trituration d'autres roches. Ce qui devait faire croire qu'il en était ainsi, c'est qu'elles sont souvent mélangées ou associées à des sables, comme si elles n'en différaient que par un degré plus grand de ténuité. D'un autre côté, on voit des roches de nature variée se réduire par l'usure, sous l'eau, en une pâte qui ressemble à de l'argile ; le quartz, le feldspath, le calcaire, dans les expériences où l'on fait frotter chacune de ces roches sur elle-même, se comportent ainsi. La boue du macadam de nos chaussées offre un exemple bien connu de ce fait.

Les argiles, comme le kaolin, se sont produites par la transformation de roches silicatées préexistantes, ainsi que l'a bien démontré Ebelmen, avec la sagacité dont tous les travaux de ce savant, si prématurément enlevé à la science, portent l'empreinte.

Quels sont les agents qui ont produit des changements dans des combinaisons aussi stables? On sait que le feldspath, en particulier, même quand il est réduit en poussière, est inattaquable par les acides chlorhydrique et sulfurique.

D'abord les roches granitiques peuvent être particulièrement préparées à subir une décomposition, non seulement par les fissures nombreuses qui les traversent, mais par

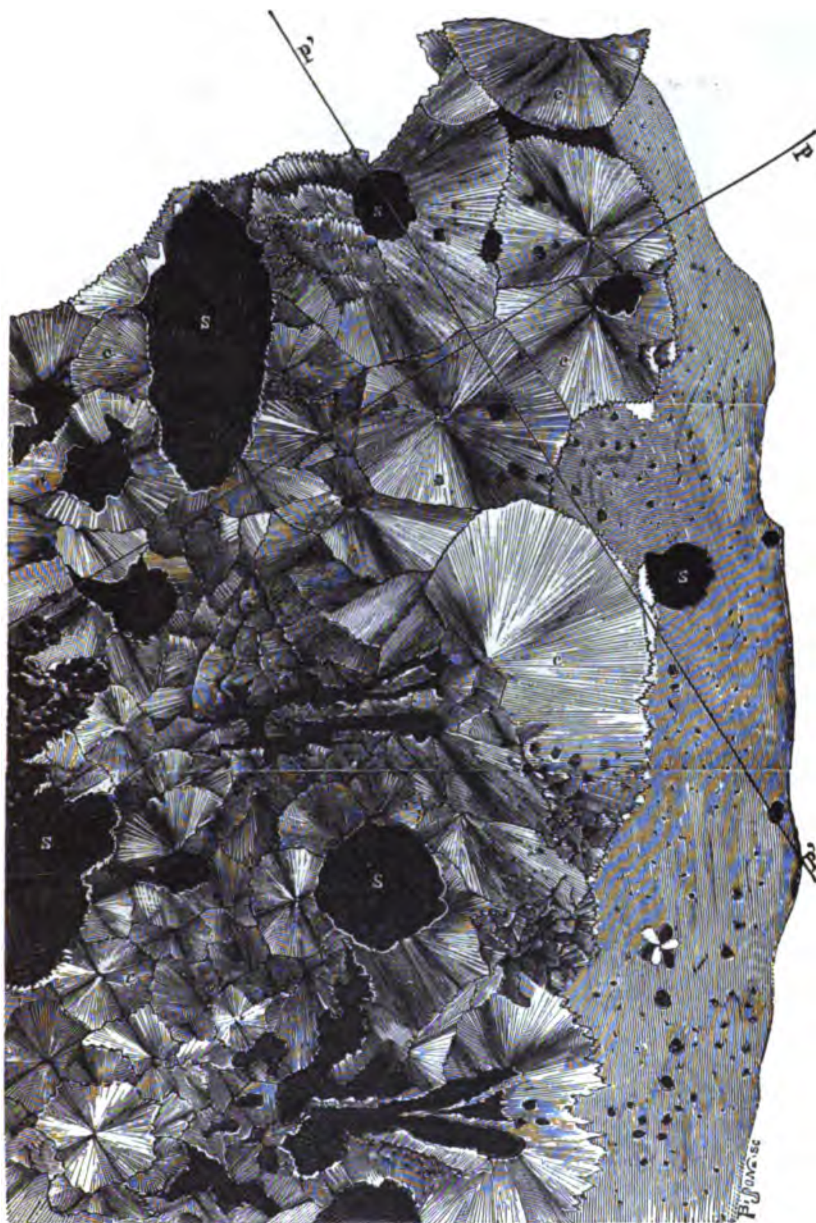


Fig. 147. — Verre transformé, observé à la lumière polarisée. Il se compose de globules juxtaposés *c*, présentant la croix noire et dont la surface est hérissée d'aspérités. — *pp*, *p'p'*, plans de polarisation principaux des nicols. — Grossissement de 100 diamètres.

d'aspérités, qui correspondent peut-être à une cristallisa-

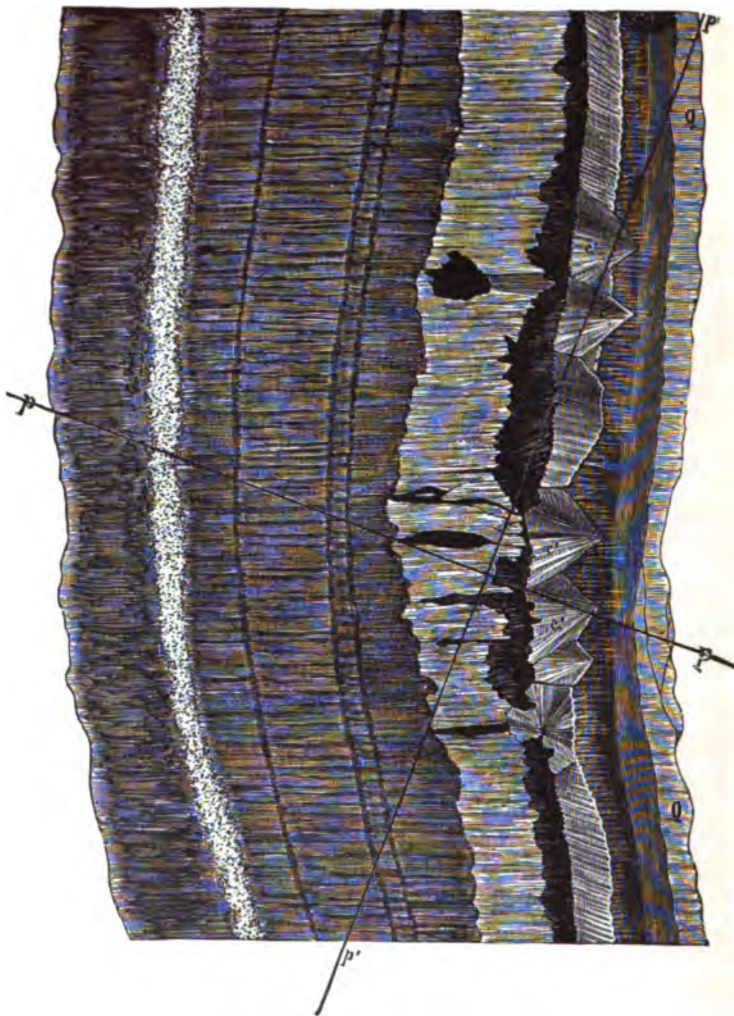


Fig. 148. — Verre transformé, observé à la lumière polarisée; coupe transversale présentant une structure à la fois concentrique et fibreuse, normale aux parois, avec des portions de globules *c'*, en forme de secteurs sphériques; Q, enduit de quartz hyalin et cristallisé appliqué sur sa surface interne. — *pp* et *p'p'*, plans de polarisation principaux des nicols. — Grossissement de 80 diamètres.

tion, ainsi que des concrétions irrégulières (fig. 146 et 147);

2° D'innombrables microlithes aciculaires, incolores, dans

lesquelles la disposition rayonnée est très fréquente (fig. 145); plus rarement, les aiguilles, au lieu d'être groupées, sont isolées (*q'*); elles résistent à l'action de l'acide, comme le ferait le quartz ou un silicate anhydre;

3° Des cristaux de pyroxène d'un vert foncé *py* (fig. 145), dont il sera question plus loin.

La lumière polarisée y fait aussi reconnaître des globules constitués par des cristaux incolores, dont chacun s'éteint parallèlement à son axe; ces globules *c* donnent la croix noire (fig. 145), à la manière de la calcédoine et de certaines zéolithes. Ces sphérolithes atteignent un rayon de 5/10es de millimètre. Leur caractère optique persiste après que la plaque mince a été soumise à l'acide chlorhydrique concentré : on doit donc supposer qu'il est dû, non à une zéolithe fibreuse, mais à une substance inattaquable, comme la calcédoine.

Sur la fig. 148, qui donne la coupe transversale d'un tube, les sphérolithes sont représentés par des secteurs sphériques *c'*, et les structures fibreuses et concentriques, que l'on reconnaît, même à l'œil nu, y sont représentées avec leurs détails.

Ce qui rend la transformation du verre, qui vient d'être signalée, encore plus remarquable, au point de vue géologique, ainsi que sous le rapport chimique, c'est qu'elle s'obtient par une quantité d'eau très faible, à peine égale au tiers du poids du verre transformé.

Dans les expériences dont il s'agit, les deux tubes n'étant pas complètement remplis d'eau, le tube en verre ne peut plonger dans le liquide que par sa partie inférieure, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur. Cependant il est toujours attaqué avec uniformité dans toute son étendue. Ce résultat prouve que, dans les conditions où nous avons opéré, la vapeur d'eau, par suite de la température et de la densité

qu'elle acquiert, agit chimiquement comme l'eau liquide. On entre alors dans un état de choses où la voie humide vient presque se confondre avec la voie sèche.

Peut-être serait-on porté à objecter que certains cristaux préexistaient dans le verre où ils resteraient latents, comme les cristaux d'étain mis en évidence par le moiré métallique après le traitement à l'acide. En effet, c'est aussi en se servant de l'action d'un acide que Leydolt[1] a voulu prouver que le verre possède, en général, une structure cristalline, et, en quelque sorte, porphyroïde : après avoir attaqué le verre par l'acide fluorhydrique, on observe sur la face corrodée des formes cristallines.

Je crois pouvoir conclure de mes observations que, dans la plupart des cas au moins, les aiguilles cristallines qui apparaissent après le traitement par l'acide fluorhydrique n'appartiennent pas à la substance vitreuse elle-même, mais au fluosilicate de potasse, qui, si l'action est lente, se dépose à la surface du verre. Les cristaux ainsi formés protègent le verre contre une érosion ultérieure : aussi, quand on lave la surface corrodée, elle paraît couverte de cristallisations; mais ces cristallisations y ont été décalquées, comme les dessins que l'on réserve par des enduits de cire, dans la gravure sur verre.

Quand le verre, au lieu d'être traité par l'acide fluorhydrique, est attaqué par un séjour, prolongé plusieurs mois, dans l'eau bouillante, comme j'ai eu occasion de le constater sur des tubes indicateurs de chaudières à vapeur, il se produit des érosions très variées, mais sans indice de cristallisation.

Cependant, dans ce dernier mode d'opérer, l'action étant très lente, les cristaux devraient apparaître bien plus net-

[1] *Comptes rendus de l'Académie*, t. XXXIV, p. 565. 1852.

tement encore que dans le premier cas, si l'opinion dont je parle était fondée.

Un autre fait prouve clairement la validité de mon observation : sur un verre incolore, qui était doublé d'une feuille mince de verre rouge de cuivre, et dans lequel on avait corrodé les verres des deux couleurs, on pouvait reconnaître sur le bord des entailles que les mêmes aiguilles passaient, sans aucune altération, du verre rouge sur le verre blanc.

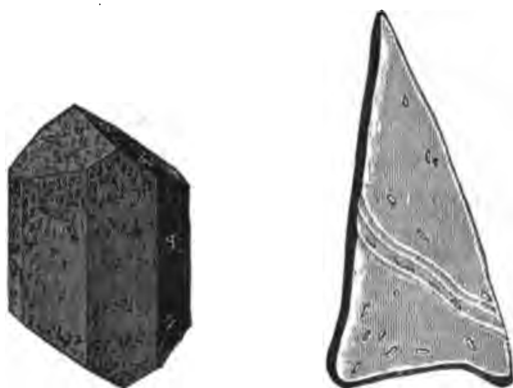


Fig. 149 et 150. — Cristal de pyroxène et fragment de feldspath, à la surface desquels est venu se déposer du quartz cristallisé *q, q, q*.— Grossissement de 3 fois pour la fig. 149; grandeur naturelle pour la fig. 150.

Elles résultaient donc simplement d'une empreinte extérieure, comme nous l'avons annoncé.

Pour s'assurer que les divers cristaux dont il vient d'être question ne préexistaient pas dans le verre soumis à l'expérience, on a examiné une tranche mince du verre non modifié. Même à l'œil nu, on peut y reconnaître des indices de couches concentriques. La lumière y fait voir aussi des défauts d'homogénéité, par exemple des fragments anguleux, qui correspondent peut-être à des grains de quartz incomplètement combinés aux bases, ainsi que quelques cristaux allongés; mais on n'y trouve rien d'analogue aux cristaux qui apparaissent à la suite de l'action de l'eau suréchauffée,

Ces divers cristaux résultent donc bien d'une transformation ou d'un métamorphisme du verre.

Les roches volcaniques vitreuses, les obsidiennes et les perlithes, soumises à l'action de l'eau suréchauffée, paraissent se comporter d'une manière comparable aux verres artificiels. Mais les résultats obtenus ne sont pas assez nettement caractérisés pour que je croie devoir les mentionner ici.

Avec les fragments d'obsidienne et de perlithe sur lesquels j'ai opéré se trouvaient des morceaux de feldspath vitreux, détachés du trachyte du Drachenfels, et de l'oligoclase de Suède. Ces deux derniers minéraux n'ont subi aucune altération appréciable[1]. On ne peut toutefois affirmer que, si l'eau n'avait pas immédiatement trouvé d'alcali à enlever à l'enveloppe, elle n'en aurait pas pris au feldspath. Des cristaux de pyroxène n'ont pas davantage changé d'aspect. Il en est à peu près de même de feuilles très minces de mica potassique de Sibérie : elles ont à peine perdu de leur transparence.

Nous voyons ici une sorte de confirmation de l'expérience précédente sur la stabilité des silicates, qui ont originairement cristallisé dans des conditions peut-être assez voisines de celles où ils se trouvaient de nouveau placés.

Dans ces dernières expériences, les morceaux de feldspath, de pyroxène et d'obsidienne ont été complètement enveloppés de cristaux de quartz, à la manière de certains bonbons qui sont incrustés du sucre cristallisé.

Pour examiner, autant du moins que la présence du verre le permettait, comment se comportent, à l'état suréchauffé, les dissolutions naturelles de silicates alcalins que l'on trouve communément dans les eaux, je me suis servi de l'eau

[1] Cependant le feldspath peut se décomposer à froid par la trituration, comme je l'ai montré ailleurs (*Annales des mines*, 5e série, t. XII, p. 547, 1857).

provenant des sources thermales de Plombières, qui est comparativement riche en silicates de potasse et de soude. Cependant, ne pouvant opérer que sur 20 à 30 centimètres cubes, j'ai préalablement concentré cette eau, par une évaporation assez rapide pour que l'acide carbonique de l'air n'en décomposât pas sensiblement les silicates, et de manière à la réduire au vingtième de son volume primitif.

Après une expérience qui avait été arrêtée au bout de deux jours seulement, les parois du tube étaient déjà recouvertes d'enduits de silice, sous la forme de quartz cristallisé et aussi de calcédoine. Comme le verre n'était encore altéré qu'à sa surface, ce dépôt devait provenir, au moins presque en totalité, de la décomposition du silicate alcalin contenu dans l'eau de Plombières.

Ainsi, sans l'application d'aucun réactif chimique, sous la seule influence de la chaleur, l'eau tenant en dissolution des silicates alcalins, telle que celle des sources de Plombières, dépose du quartz cristallisé ou cristallin.

Production de silicates anhydres à l'état cristallisé. — Parmi les produits de ces expériences, il en est un qui mérite une attention particulière. A la surface et dans l'intérieur de la masse blanchâtre résultant de la transformation du tube de verre, j'ai obtenu d'innombrables cristaux très-petits, mais de forme parfaitement nette, doués de beaucoup d'éclat et bien transparents; ils présentent diverses nuances de vert, et beaucoup d'entre eux ont la teinte vert-olive. Leur forme est celle d'un prisme oblique symétrique, dont les bases sont remplacées par deux biseaux; deux des arêtes opposées sont ordinairement tronquées, comme dans le pyroxène que Haüy a nommé homonome (fig. 151 et 152). Ces cristaux rayent sensiblement le verre; ils restent inaltérables en présence de l'acide chlorhydrique concentré et bouillant. Ils fondent au chalumeau en un émail noir. Enfin ils ont la composition

du pyroxène à base de chaux et de fer, et, par leur transparence, ils appartiennent à la variété diopside.

Ces cristaux sont, les uns isolés, les autres groupés de manière à former de petits globules hérissés de pointements, et plus rarement des incrustations minces. Les uns et les autres rappellent immédiatement par leur aspect les cristaux de diopside les plus connus.

En outre, en examinant au microscope, comme il a été dit plus haut, des tranches minces du verre transformé, j'ai reconnu, à part les globules de calcédoine, des cristaux ver-

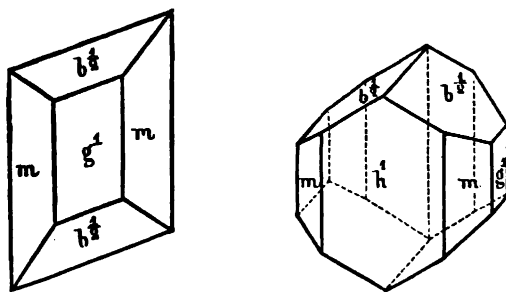


Fig. 151 et 152. — Forme des cristaux de pyroxène diopside, obtenus dans la décomposition du verre par l'eau surchauffée. La figure 151 le montre de profil, comme il se présente fréquemment. La figure 152 le donne en perspective. — Grossissement : 250 diamètres.

dâtres *py*, ayant la forme caractéristique du pyroxène (fig. 145); ils présentent les faces *p*, *m* et *g*, la face *p* étant prédominante. Ces cristaux sont quelquefois terminés assez irrégulièrement, comme s'ils étaient maclés; mais la manière dont ils se comportent à la lumière polarisée montre qu'il n'en est pas ainsi. Comme il arrive souvent dans le pyroxène des roches, on remarque des inclusions, qui n'ont pas l'éclat métallique de la magnétite, mais plutôt l'éclat pierreux (tel que celui de la picotite). Dans l'échantillon observé, ces cristaux de pyroxène sont associés à de nombreux sphérolithes; ils se montrent surtout dans les parties où ces derniers sont clairsemés et se rapprochent quelquefois jusqu'à des distances de 1/10e à 1/20e de millimètre.

De l'argile de Klingenberg, près Cologne, que l'on emploie pour faire les creusets de verrerie, étant chauffée dans des tubes en verre, se charge d'une multitude de paillettes blanches, nacrées et douées de l'éclat du mica. Elles sont hexagonales et jouissent d'un axe optique de double réfraction [1]. Elles sont fusibles, indiquent au chalumeau la présence de la silice. Elles sont attaquables par l'acide chlorhydrique, qui manifeste les réactions de l'alumine. La trop faible quantité de ces paillettes que j'ai obtenues jusqu'à présent ne m'a pas permis d'en faire l'analyse quantitative. Il paraît toutefois très-probable que la substance est un mica à un axe ou une chlorite.

Réduction du bois en anthracite. — Les végétaux fossiles



Fig. 153. — Anthracite obtenue dans la décomposition du bois, et granulée par l'eau surchauffée; la forme de ces globules annonce que la substance a nécessairement passé par un état de ramollissement. — Grandeurs naturelles.

ayant subi des modifications sous l'influence des mêmes agents que les matières pierreuses, il convenait de voir ce que devient du bois dans l'eau suréchauffée.

Des fragments de bois de sapin se sont transformés en une masse noire, douée d'un vif éclat, d'une compacité parfaite ayant, en un mot, l'aspect d'une anthracite pure, elle est assez dure pour qu'une pointe d'acier la raye difficilement.

Cette sorte d'anthracite, bien qu'infusible, est entièrement granulée sous forme de globules réguliers de diverses dimensions (fig. 153), d'où il résulte clairement que la substance a été *fondue* en se transformant. Sa calcination ne donne que des traces de substances volatiles; la matière ligneuse est

[1] D'après l'examen qu'en a bien voulu faire de Sénarmont.

donc arrivée à son dernier degré de décomposition. Ce carbone compact ne se consume qu'avec une excessive lenteur, même sous le dard oxydant du chalumeau. Il diffère des charbons formés à haute température, en ce qu'il ne conduit pas l'électricité, non plus que le diamant.

Dans ces expériences, il s'est formé aussi des produits liquides et volatils, ressemblant aux bitumes naturels par leur odeur caractéristique.

Les filons d'argent de Kongsberg en Norwège, qui sont encaissés dans le gneiss, renferment de l'anthracite qui présente la plus grande ressemblance avec l'anthracite artificielle dont il vient d'être question. Elle s'est moulée au milieu de la chaux carbonatée et de l'argent natif, sous des formes qui annoncent qu'elle a aussi passé par un état de mollesse. L'anthracite découverte en Russie, à Chounga, au nord du lac Onéga, offre aussi le même aspect.

A des températures moindres et dans des conditions d'ailleurs analogues, le bois se transforme en une sorte de lignite ou de houille ; c'est ce qui résulte déjà des expériences de Cagniard de Latour[1].

Ainsi que nous venons de l'exposer, l'eau suréchauffée, vers 500 degrés, devient capable de former, non-seulement le quartz, mais encore de produire et de faire cristalliser des silicates anhydres, tels que le pyroxène diopside. Des combinaisons semblables avaient déjà été produites, il est vrai, par la voie sèche, mais à des températures incomparablement plus élevées que celle où la présence de l'eau permet de les obtenir. Dans ce dernier cas, le point de cristallisation est de beaucoup au-dessous du degré de fusion. C'est la première fois qu'un silicate anhydre et cristallisé a été obtenu au milieu et par l'intermédiaire de l'eau.

[1] *Comptes rendus de l'Académie*, t. XXXII, p. 295 ; 1851.

En résumé, on reconnaît, par les expériences qui précèdent, que l'eau suréchauffée a une influence très énergique sur les silicates ; elle en dissout un grand nombre, détruit certaines combinaisons à bases multiples, en fait naître de nouvelles, soit hydratées, soit anhydres ; enfin elle fait cristalliser ces nouveaux silicates bien au-dessous de leur point de fusion. L'acide silicique mis en liberté dans ces dédoublements s'isole sous forme de quartz cristallisé.

Des transformations si complètes sont d'ailleurs obtenues par de très faibles quantités d'eau. En général on y distingue cette loi que, vers le rouge naissant, les affinités de la voie humide acquièrent, en ce qui concerne la production des silicates, le même caractère que celles de la voie sèche.

On voit comment la formation de silicates anhydres et cristallisés, par l'intermédiaire de l'eau, trouve son application dans de nombreux phénomènes, tels que ceux du métamorphisme, par exemple, dans d'importants massifs de phyllades et dans des calcaires qui, bien que parfois d'époque géologique peu ancienne, ont servi de milieu de production à des silicates anhydres, tels que le grenat, le pyroxène, l'amphibole, le wernérite et l'albite.

De même, en voyant le quartz se séparer si facilement du verre, il est impossible de ne pas reporter sa pensée sur les veines de quartz qui sillonnent les quarzites et les phyllades et qui se sont probablement formées, comme dans l'expérience, aux dépens des roches avoisinantes.

Dans les expériences qui ne durent que quelques jours, on a dû avoir recours à une haute température pour faire cristalliser des silicates anhydres au milieu de l'eau. Mais sans doute il ne serait nullement nécessaire d'un degré de chaleur aussi élevé si, au lieu de se réaliser en un temps aussi court, les réactions pouvaient ne se développer que lentement. Ce qui s'est passé dans les maçonneries romaines

de Plombières fournit à ce sujet un fait significatif, en montrant, produits avec l'aide des siècles, des silicates cristallisés que les expériences les plus ingénieuses n'ont pu parvenir à imiter.

En même temps que cette étude du métamorphisme fait ressortir la puissance de l'expérience pour la démonstration des phénomènes géologiques, ainsi que je l'ai exposé ailleurs[1], elle nous permet de prendre, en quelque sorte sur le fait, l'eau souterraine dans l'accomplissement d'une de ses fonctions les plus générales et les plus importantes.

[1] *Géologie expérimentale*, p. 131-234.

LIVRE IV

ROLE DES EAUX SOUTERRAINES DANS L'ORIGINE DES SUBSTANCES CONSTITUANT LES TERRAINS STRATIFIÉS.

INTRODUCTION

Les débris d'animaux et de végétaux que les sédiments des anciennes mers renferment avec tant d'abondance ont attiré tout particulièrement l'attention des géologues, surtout depuis un demi-siècle. L'étude des fossiles a porté, non seulement sur leur nature même, leurs formes et leur constitution, mais aussi sur leur répartition dans la série des couches et leur succession dans le temps. On est ainsi parvenu à établir une série chronologique des assises, et à faire des rapprochements entre des divisions, étages et sous-étages, qui paraissent avoir été déposés simultanément dans les pays les plus distants.

A un tout autre point de vue, les terrains stratifiés ont aussi révélé des faits d'une importance capitale. Les dérangements considérables qu'ils ont subis, depuis qu'ils ont perdu l'horizontalité sous laquelle ils avaient été originairement formés, c'est-à-dire les ploiements et redressements de leurs strates, ont fait ressortir, en effet, d'une manière palpable, le caractère, l'énergie et les directions des actions

mécaniques dont la croûte terrestre présente, de toutes parts, l'empreinte saisissante.

Il est un troisième ordre de questions que fait naître l'étude des roches de cette grande catégorie ; ce sont celles qui concernent leur mode même de formation, c'est-à-dire leur histoire physique et chimique.

Ce qui se passe aujourd'hui dans la mer, c'est-à-dire les actions par lesquelles des matériaux de nature variée y sont étalés au loin et nivelés par la nappe liquide, puis se superposent graduellement les uns aux autres, fournit des termes de comparaison instructifs sur la formation des roches stratifiées.

Mais au delà de cette mise en œuvre par les eaux de surface, marines ou lacustres, se présente une question primordiale. Avant que ces puissants remblais, d'un volume si considérable, eussent été étendus comme nous les voyons, où étaient les différents corps qui y sont aujourd'hui combinés et accumulés? Où la mer a-t-elle trouvé à s'emparer d'une telle quantité de matériaux? Quelle est, en un mot, l'origine des substances qui constituent les terrains stratifiés?

On sait comment Werner, dans un système qui avait généralement cours à la fin du siècle dernier, faisait dériver de la mer primitive la totalité des matériaux qui composent les terrains stratifiés; il n'en exceptait même pas les masses cristallines qui leur servent de support.

Pendant le premier quart de ce siècle, bien des observations démontrèrent que beaucoup de masses ont été intercalées, de bas en haut, dans l'intérieur des terrains sédimentaires, et que les filons métallifères ont également été remplis par des exhalaisons émanant des régions profondes du globe. Dès lors, on fut amené à soupçonner une origine analogue pour certaines substances qui entrent dans la constitution même des terrains stratifiés. Cette supposition se trouvait appuyée par cet autre fait, que l'on arriva à con-

stater, que les sources thermales et gazeuses sont aussi en relation avec les dislocations profondes, même dans des régions qui ne sont pas traversées par des roches éruptives.

D'ailleurs, des exemples à l'appui de ce dernier procédé de formation étaient fournis par les couches tertiaires du bassin de Paris, qui, déjà à cette époque, avaient été étudiées d'une manière approfondie. Dès 1812, d'Omalius constatait une ressemblance des calcaires d'eau douce de la France et de divers autres pays avec les dépôts formés récemment, aux environs de Rome, par les sources minérales incrustantes; on était donc autorisé à considérer les premiers comme formés dans des conditions semblables, c'est-à-dire comme étant d'anciens *travertins*[1]. Cette opinion fut bientôt adoptée et confirmée par Alex. Brongniart (1822)[2].

La manière d'être d'autres substances, moins abondantes que le calcaire, faisait aussi soupçonner une intervention des agents de la profondeur dans la formation des terrains stratifiés. L'action de vapeurs magnésiennes, à laquelle Léopold de Buch croyait devoir recourir pour expliquer la formation des dolomies du Tyrol, dans le mémoire célèbre qu'il publia en 1822, le conduisait à supposer que des actions du même genre avaient contribué à la formation de certains dépôts de gypse, autour du Hartz (1824). Il est juste de rappeler que, dès 1821, Becquerel avait frayé une autre voie tendant au même but, en signalant, dans l'argile plastique des environs de Paris, de la blende et de la strontiane sulfatée. L'arrivée de cette dernière substance fut bientôt rattachée par Brongniart aux failles, tapissées d'élégants cristaux, que présente la même contrée[3].

[1] *Journal des Mines*, tome XXXIII, page 402.

[2] *Description géologique des environs de Paris*, édition de 1822, p. 312, 3e édition, 1835, p. 556.

[3] Même ouvrage, édition de 1822, p. 75.

Comme contre-partie expérimentale de ces observations, Berzélius, à la suite d'une analyse des plus habiles, publiée en 1823, saisissait la strontiane sulfatée et le fluorure de calcium en voie de formation, dans les dépôts des sources thermales de Carlsbad.

Au même moment, de Bonnard appelait l'attention sur la présence de minerais métalliques, en beaucoup de points, dans les terrains stratifiés de la France centrale qui sont juxtaposés au granite.

D'un autre côté, l'hypothèse qu'avait émise Lazzaro-Moro, en 1740, en attribuant une origine éruptive au sel gemme, ainsi qu'au soufre et au bitume, était reprise et appliquée par de Charpentier (1823) à l'amas de Bex, qui est associé à de l'anhydrite, et d'Alberti, dans l'étude classique qu'il faisait de ce terrain, en 1834, se ralliait à la même hypothèse, maintenant abandonnée, pour tout le sel gemme subordonné au trias. D'ailleurs, l'examen des gîtes de minerai de fer pisolithique avait conduit (1828) Alexandre Brongniart à une conclusion semblable, qui devait bientôt, naturellement, s'appliquer aussi aux dépôts siliceux ou meulières des terrains tertiaires[1]. Une origine analogue fut étendue à d'autres substances par d'Omalius, particulièrement à certaines argiles et à certains sables, qui, notamment en Belgique, paraissent participer au mode de formation de la calamine[2] (1841 et 1855), et que Dumont nomma dépôts *geysériens* (1854). D'un autre côté, par ses belles recherches sur la décomposition des espèces minérales de la famille des silicates, Ebelmen découvrait, en 1845, des liens directs qui unissent les roches sédimentaires aux roches éruptives. On sait enfin avec quel ensemble d'arguments le classique tra-

[1] *Description géologique des environs de Paris*, 3ᵉ édit., 1835, p. 556.
[2] *Bulletin de la Société géologique de France*, 2ᵉ série, t. XII, p. 242 ; 1856.

vail que Élie de Beaumont publia, en 1847, sur les émanations volcaniques et métallifères, confirmait dans cet ordre d'idées.

C'est ainsi que diverses substances appartenant aux dépôts sédimentaires étaient reconnues ou, au moins, étaient supposées provenir des régions profondes.

Bien que le problème soit d'un abord difficile et qu'il ne soit pas susceptible d'une solution précise et certaine, ce n'est pas une raison pour l'éviter indéfiniment; car il est du nombre de ceux qui s'imposent sans cesse à l'esprit de l'observateur, comme se rattachant, de la manière la plus directe, à l'économie générale du globe.

§ 1. — APPORTS DES PARTIES EXTERNES ET PARTICULIÈREMENT DE L'ÉCORCE CRISTALLISÉE.

Considérées dans leur nature minérale, les roches stratifiées, quelque développées qu'elles soient, sont peu variées. Trois espèces, le quartz, l'argile et le carbonate de chaux, y prédominent considérablement, quelquefois à peu près pures, le plus souvent à l'état de mélange. La dolomie n'y est pas rare; le gypse et l'anhydrite, le sel gemme, ainsi que les combustibles charbonneux, y occupent une place beaucoup plus restreinte. Il importe encore de signaler, quoique en proportions relativement faibles, les phosphates, la pyrite, ainsi que les oxydes et carbonates de fer, qui sont fréquemment associés à ces roches.

Si l'on poursuit les dépôts sédimentaires jusqu'à une profondeur suffisante, on les voit s'arrêter partout, pour faire place à des masses d'une autre composition minéralogique, de nature éminemment cristalline, et dépourvues de

fossiles. Ces dernières, qu'on a désignées sous l'épithète générale *cristallisées*, ont été soumises à des conditions spéciales; elles sont principalement réprésentées par le granite et le gneiss. Dans toutes les parties du globe, cette sorte de soubassement se présente avec une uniformité très remarquable, qui atteste l'unité de son mode de formation.

Des roches moins anciennes ont pu, sur des massifs considérables, prendre la structure cristalline sous l'influence de certaines actions calorifiques et chimiques, c'est-à-dire devenir métamorphiques, comme en Toscane et dans diverses parties des Alpes. Mais lorsque les terrains siluriens ont commencé à se déposer, l'assise sur laquelle ils s'étendaient était sans doute déjà cristalline, à peu près comme elle l'est aujourd'hui. En effet, le contraste que les couches siluriennes les plus anciennes présentent avec le gneiss sous-jacent, par exemple en Suède et aux États-Unis, atteste l'ancienneté de l'état cristallin de ce dernier. Il en est de même des galets et des autres débris granitiques, que renferment parfois les couches siluriennes inférieures, sans qu'elles-mêmes aient été sensiblement transformées.

C'est donc sur un fondement préexistant de roches cristallines, parmi lesquelles le gneiss prédomine, que se sont empilées successivement, depuis des époques extrêmement reculées, les roches stratifiées fossilifères, comme les innombrables couches annuelles d'un arbre gigantesque.

Dans les considérations qui suivent, nous ne chercherons pas à remonter au delà du terrain silurien, à cause des incertitudes qui règnent encore sur les couches plus anciennes, cambriennes et autres.

L'eau, qui se meut de toutes parts à la surface des continents et dans le bassin de l'Océan, peut être considérée comme un gigantesque agent de trituration, de charriage et de dépôt. Depuis que l'eau constitue à la surface du globe

une masse liquide, elle n'a pas dû cesser d'agir ainsi, et de former des sédiments avec des dépouilles arrachées à l'écorce solide. Aussi, quand on examine l'ensemble des roches déposées par les eaux sur le globe, on est frappé du grand développement qu'y occupent des masses évidemment formées par la démolition de roches préexistantes.

Il ne s'agit pas seulement de ces vastes traînées de matériaux, blocs épars, graviers, sables, limons, qui se montrent de toutes parts, et qui ont été étendues à la surface du sol par d'anciennes eaux courantes ou par des glaciers, depuis que les continents sont émergés. Les terrains stratifiés proprement dits renferment, dans tous leurs groupes, des cailloux qui ne laissent point de doute sur leur origine, qu'ils soient restés incohérents, ou qu'ils aient été cimentés et constituent des poudingues.

Les produits de la trituration, c'est-à-dire la plupart des sables et des limons, sans être aussi caractérisés que les matériaux grossiers dont il vient d'être question, sont incomparablement plus développés. Les cailloux et les poudingues n'occupent qu'une place comparativement restreinte. Ils sont en quelque sorte exceptionnels, recouvrant souvent d'anciens littoraux, et parfois formés à peu près sur place. Il est facile de comprendre que de tels triages se soient opérés dans cet immense atelier de préparation mécanique.

Des effets de retrait, dus à une contraction opérée tantôt par le refroidissement, tantôt par la dessiccation, n'ont pas seuls fissuré les roches et contribué à préparer les fragments que les eaux ont emportés. Les brisements de l'écorce terrestre par les actions souterraines ont eu, dans beaucoup de lieux, une influence marquée sur les démolitions et sur la formation des poudingues; par exemple, pour ceux qui sont si grandement développés sur la lisière septentrionale des

se rattacher intimement à celle de la vie végétale et animale dans la série des âges.

Rarement à l'état de liberté, comme dans le graphite ou le diamant, il est presque toujours combiné, de même que le soufre; ses combinaisons peuvent se ranger sous deux groupes; dans les unes, telles que la houille et les bitumes, il est associé à de l'hydrogène, à de l'oxygène, et, généralement, à de l'azote; les autres, comme le calcaire, le contiennent à l'état de carbonate.

Les combustibles minéraux, anthracite, houille et lignite, enfouis dans les terrains stratifiés, ont fixé une énorme quantité de carbone. On peut en juger par les évaluations grossièrement approximatives, dont un certain nombre de bassins houillers, renfermant des couches de houille nombreuses et puissantes, ont été l'objet. Ainsi, on a calculé que le seul bassin de Saarbrück équivaut, pour le carbone, au $\frac{1}{41}$ de ce que contient toute l'atmosphère[1]. En bien des pays, on voit les terrains houillers se prolonger et disparaître sous des sédiments plus récents; dans d'autres cas, sans doute, ces derniers nous en cachent complètement l'existence; les indications que fournissent les bassins houillers connus sont donc un minimum qui peut être beaucoup dépassé.

D'ailleurs, des dépôts de combustibles aussi très utiles se trouvent dans des terrains moins anciens : tel est le lignite, si abondant dans les terrains tertiaires de diverses parties de l'Europe.

Ce que l'on comprend ordinairement sous le nom de bitumes représente un autre groupe de combinaisons carburées, dont la nature varie depuis le pétrole jusqu'à l'asphalte. Les gisements des États-Unis et du Canada, où le bitume

[1] D'après les évaluations de M. Dechen.

ainsi par l'usure et deviennent ce qu'on appelle des galets. Mais les menues parcelles, qui sont assez légères pour demeurer en suspension, flottent indéfiniment, en restant isolées, contrairement à ce qui arrive pour les premiers. Elles peuvent donc être très longtemps le jouet des eaux et franchir de longues distances sans se briser, ni sans subir de frottement notable et s'user davantage. Il en est ainsi tant que les filets d'eau qui les portent conservent une vitesse suffisante. Si donc les particules étaient anguleuses au moment où le liquide les a enlevées, elles demeurent indéfiniment telles, jusqu'à ce qu'une diminution dans la vitesse les fasse atterrir ensemble et trouver finalement le repos.

Sous l'influence des mêmes agents mécaniques, le mica qui se présente en lamelles minces et très clivables, se réduit en parcelles de plus en plus minces. Ce minéral reste donc en paillettes, comme celles que l'on voit disséminées dans des grès et des argiles de différents âges, et auxquelles ces roches doivent souvent une structure feuilletée. Le grès houiller ou psammite et le grès bigarré, ainsi que les argiles qui leur sont subordonnées, offrent des exemples bien connus de détritus plus ou moins micacés, dans lesquels le mica n'a certainement pas été formé sur place. Il en est de même du grès dit de Fontainebleau. Deux propriétés rendent compte de la persistance remarquable du mica, en lamelles très reconnaissables, au milieu de nombreuses roches sédimentaires. D'une part, les lamelles arrivent bientôt à un degré de ténuité tel qu'elles cessent de subir des frottements, comme le sable quartzeux à grain très fin dont il vient d'être question, et d'autant mieux que, à volume égal, leur forme aplatie est favorable à ce mode de suspension et d'entraînement. D'autre part, malgré son état de division, le mica résiste remarquablement aux actions chimiques qui décomposent ou dissolvent un grand nombre d'autres miné-

raux. Son éclat le fait d'ailleurs mieux reconnaître, en particules fines, que la plupart des autres minéraux.

Quant au troisième minéral constituant, il se comporte autrement que ses deux compagnons.

Lorsque le granite se désagrège simplement sur place et se réduit en arène, le feldspath s'isole en grains distincts, ainsi qu'on le voit dans les arkoses triasiques, liasiques et tertiaires de la France centrale, ou dans beaucoup de grès du terrain houiller et du terrain permien. Mais, à la suite d'une trituration, il n'a pas, comme le quartz et le mica, le privilège de conserver des dimensions appréciables et ses caractères minéralogiques; par suite, il cesse de pouvoir être reconnu; il s'efface. Sa dureté ne l'empêche pas, en effet, de se transformer rapidement en une poussière très fine et souvent plastique, une sorte de boue qui offre l'aspect de certaines argiles.

Ce fait, qui a été constaté dans les expériences, résulte de la fragilité connue du feldspath, suivant deux systèmes de clivage.

C'est ainsi qu'à part les argiles proprement dites, dont je ne parle pas en ce moment, bien des masses appartenant aux terrains stratifiés sont ordinairement classées parmi les roches argileuses, tandis qu'elles doivent être assimilées à des limons feldspathiques, qui ont été formés pendant les anciennes périodes, de même que nous le voyons aujourd'hui.

On sait quelle place considérable les phyllades, roches dont l'ardoise présente une variété bien connue, occupent dans les terrains de sédiment anciens ou paléozoïques, où ils sont fréquemment associés à des quartzites et à d'autres roches arénacées.

Le terrain silurien, en particulier, présente des massifs très importants de cette roche dans diverses régions

du globe, en Europe, dans les deux Amériques et en Australie[1].

Le nom de *schiste argileux* (*thonschiefer*), par lequel on a, autrefois, désigné les phyllades, et qu'on leur donne encore très souvent, est de nature à induire en erreur, en les assimilant aux argiles, dont ils seraient des variétés fortement durcies. Au lieu de se délayer avec rapidité en présence de l'eau, comme ces dernières, les phyllades ont assez de cohésion pour pouvoir lui résister indéfiniment. De même que les argiles, ils se composent principalement de silicate d'alumine ; mais, à part une proportion d'eau beaucoup moindre, ils en diffèrent encore par la présence, en quantité notable, de plusieurs bases ; ce sont souvent les mêmes que celles qui entrent dans la composition du granite. Certaines variétés de phyllades renferment jusqu'à 6 et 7 pour 100 de potasse, et présentent parfois une composition élémentaire identique à celle de certaines roches granitiques considérées dans leur ensemble, comme l'ont fait remarquer Berzelius pour un schiste de Bornholm, et, plus tard, G. Bischof[2]. Si la teneur en silice présente de forts écarts, cela s'explique principalement par des mélanges de quartz très fin, que le microscope constate et que l'analyse immédiate a souvent pu isoler. Malgré la grande différence d'aspect qui sépare ces deux roches, on est donc autorisé à les rapprocher et à considérer la matière première de beaucoup de phyllades comme dérivant des roches feldspathiques ou granitiques,

[1] C'est dans ce groupe que l'on exploite l'ardoise, à Angers, dans les Ardennes, dans le pays de Galles, et ailleurs. Cependant des terrains moins anciens en fournissent aussi : tels sont, dans les Alpes, le terrain jurassique et même le terrain tertiaire éocène ; les ardoises de Barcelonnette, dans les Basses-Alpes, et du Plattenberg, en Suisse, proviennent de ce dernier.

[2] D'après de nombreuses analyses, comme dans le granite, la potasse prédomine souvent dans le phyllade par rapport à la soude ; de même la magnésie par rapport à la chaux.

plutôt par une simple trituration que par une décomposition.

Cette ressemblance explique d'ailleurs la facilité avec laquelle ces phyllades ont pu, sous certaines actions calorifiques, se métamorphiser, c'est-à-dire reprendre un état cristallin, notamment par l'apparition du mica.

Quant à la structure feuilletée qui caractérise les phyllades, elle s'est produite postérieurement à leur formation. Elle résulte très probablement d'un laminage, opéré sous l'influence de pressions énergiques, qui ont aussi ployé les couches et ont eu souvent la puissance de les redresser sous des formes montagneuses[1].

Les roches désignées sous le nom d'*argilolithes* ou d'*argilites* se distinguent aussi des argiles proprement dites, non seulement par leur degré de consistance, mais aussi par leur composition[2]. Elles sont particulièrement fréquentes dans le terrain permien, où elles se trouvent souvent associées au porphyre feldspathique. Les environs de Saint-Pétersbourg en présentent, qui appartiennent au terrain silurien[3]. De même que les phyllades, les argilolithes se rapprochent fréquemment du feldspath par leur composition.

Les terrains stratifiés renferment aussi, comme chacun le sait, des couches d'argile, qui, ordinairement, sont impures. Les terrains les plus anciens n'en contiennent pas souvent, au moins dans l'Europe occidentale : elles y sont remplacées par les phyllades[4]. Dans le terrain houiller, les argiles schisteuses abondent et forment, avec les grès, les fidèles com-

[1] Études et expériences sur le métamorphisme. *Annales des Mines*, 5e série, t. XVI, p. 461, 1861, *Bull. Soc. géol.*, 2e série, t. XVIII, p. 487. *Géologie expérimentale*, p. 131 à 234.

[2] Knopp, *Neues Jahrbuch fur Mineralogie*, 1859, p. 582.

[3] Delesse et de Lapparent, *Revue de géologie*, 1886, p. 74.

[4] Il n'en est pas de meme dans les contrées où, comme en Russie ou aux États-Unis, ces couches sont restées horizontales.

pagnons de la houille. Les amas de sel gemme qui se montrent fréquemment dans le trias sont, en général, enclavés dans des argiles ou des marnes, auxquelles ils doivent leur préservation contre l'infiltration des eaux. Dans le terrain jurassique, divers étages d'argiles ou de marnes alternent avec les calcaires. Il en est de même dans le terrain crétacé, où l'on en exploite de très estimées, ainsi que dans les terrains tertiaires. Beaucoup d'argiles utiles se rencontrent aussi dans les terrains de transport.

On avait autrefois considéré les argiles comme le résultat de la trituration d'autres roches. Ce qui devait faire croire qu'il en était ainsi, c'est qu'elles sont souvent mélangées ou associées à des sables, comme si elles n'en différaient que par un degré plus grand de ténuité. D'un autre côté, on voit des roches de nature variée se réduire par l'usure, sous l'eau, en une pâte qui ressemble à de l'argile ; le quartz, le feldspath, le calcaire, dans les expériences où l'on fait frotter chacune de ces roches sur elle-même, se comportent ainsi. La boue du macadam de nos chaussées offre un exemple bien connu de ce fait.

Les argiles, comme le kaolin, se sont produites par la transformation de roches silicatées préexistantes, ainsi que l'a bien démontré Ebelmen, avec la sagacité dont tous les travaux de ce savant, si prématurément enlevé à la science, portent l'empreinte.

Quels sont les agents qui ont produit des changements dans des combinaisons aussi stables? On sait que le feldspath, en particulier, même quand il est réduit en poussière, est inattaquable par les acides chlorhydrique et sulfurique.

D'abord les roches granitiques peuvent être particulièrement préparées à subir une décomposition, non seulement par les fissures nombreuses qui les traversent, mais par

l'état de pulvérisation qu'elles éprouvent sur place, en se réduisant en *arène*. Une fois désagrégées de cette manière, les roches résistent plus difficilement aux agents qui tendent à les décomposer.

Parmi ces agents, il en est qui résident dans l'atmosphère et qui, chaque jour encore, tout faibles qu'ils paraissent, ont une part dans certaines décompositions : tels sont l'acide carbonique de l'air, l'acide nitrique qui s'y développe, et des acides organiques, dont le rôle se manifeste surtout par les bariolures blanches qu'ils produisent dans beaucoup de sables ocreux.

Quoique l'atmosphère puisse produire des changements très notables, surtout avec le secours du temps, certains effets ne peuvent lui être attribués et paraissent relever des agents émanant de la profondeur. Divers gîtes de kaolin apportent la preuve d'une intervention de ce dernier ordre, lorsqu'ils sont associés à des filons métallifères, comme sur plusieurs points du Cornouailles. A Carglaze, par exemple, ce sont les agents qui ont apporté l'étain de la profondeur et produit les petits filons de quartz et de tourmaline, qui ont attaqué le granite. La date du phénomène et la cause de la modification paraissent être attestées par les cristaux bien connus, dans lesquels l'étain oxydé, accompagné de quartz, est venu se substituer au feldspath, sans que la formation de ce dernier minéral ait été altérée. Dans divers points des Pyrénées, par exemple à Pouzac, la décomposition des ophites ne doit probablement pas être attribuée à des actions superficielles, non plus que celle de beaucoup de porphyres dits argileux (*thonporphyr*), de roches amygdaloïdes et de wackes.

Il arrive, encore aujourd'hui, des profondeurs des agents qui sont de nature à opérer des décompositions de ce genre comme l'acide chlorhydrique, l'acide carbonique qu'exhalent

les volcans ; aussi, dans certaines localités, les roches volcaniques sont devenues molles et comme argileuses, par suite du passage de ces vapeurs à la fois acides et chaudes. D'un autre côté les eaux alcalines décomposent aussi les silicates[1].

Une fois formées, les argiles, comme le kaolin, sont quelquefois restées sur la place où elles ont pris naissance ; mais elles sont si faciles à délayer qu'elles ont été, en général, enlevées par les eaux et charriées à des distances considérables de leur point de départ. Elles sont ainsi arrivées à la mer ou à des lacs où elles se sont étendues en couches, alternant avec d'autres roches.

Pendant longtemps, tandis que la potasse était reconnue dans toutes les plantes terrestres que l'on incinérait, on ne parvenait pas à en constater la présence dans le sol. Aussi avait-on été conduit à supposer que cette substance se produisait par la force vitale des végétaux. Ce fut donc un étonnement général lorsque, à la fin du siècle dernier, l'*alcali végétal* fut signalé dans le règne inorganique. C'est en 1794 qu'il fut découvert par Klaproth, dans le minéral nommé leucite ou amphigène, lequel, faisant partie des laves du Vésuve, ne pouvait l'avoir tiré des végétaux[2]. Cependant on ne s'expliquait pas encore complètement comment la potasse arrive d'une manière générale aux végétaux qui croissent sur des sols très différents, calcaires et arénacés, où l'on n'aperçoit pas de détritus granitiques, lorsqu'il fut constaté, par des analyses attentives, que les argiles, outre leurs trois éléments essentiels, la silice, l'alumine et l'eau, renferment presque toujours de la potasse en quantités notables. Les argiles qui se sont mélangées aux terres végétales apportent

[1] Delesse a étudié les actions de ce genre, *Bull. Soc. géol.*, 2e série, t. XI, 1853, p. 127.

[2] Ce ne fut que plus tard, au commencement de ce siècle, que ce même alcali fut observé dans le feldspath.

donc, en même temps que des propriétés absorbantes et plastiques fort utiles, cet élément indispensable de fertilité.

A un autre point de vue, la présence habituelle de la potasse dans les argiles mérite d'être mentionnée, parce qu'elle concorde avec la supposition que ce minéral se rattache fréquemment, par son origine, aux roches feldspathiques. Dans la décomposition de ces silicates extrêmement stables, les protoxydes n'en sont éliminés que difficilement et lentement, et le départ n'est pas, ordinairement, arrivé à être assez complet pour qu'il ne reste pas une certaine quantité de potasse, comme un témoin du mode originel de combinaison. En somme, notre premier réservoir de potasse est réellement dans les roches granitiques, qui contiennent cette base, non seulement dans leur feldspath, mais dans leur mica[1]. Toutefois cette base est si énergiquement combinée dans ces deux espèces, que les végétaux ne la leur soutirent que très difficilement et avec lenteur, tandis qu'à l'état où elle est amenée dans les argiles et ensuite dans la terre végétale elle paraît mieux se prêter à l'assimilation.

§ 2. — APPORTS DES PARTIES INTERNES.

Quelque abondants que soient les matériaux enlevés à l'écorce granitique par trituration ou par décomposition, ils ne constituent pas la totalité de ces séries puissantes de couches qui enveloppent le globe sur une partie très considérable de son étendue.

Les déjections des volcans, qui sont, pour la plupart, sur le littoral des continents ou dans des îles, arrivent, pour une

[1] Un granite de composition moyenne renferme de 5 à 6 pour 100 de potasse.

part considérable, dans la mer, soit en y tombant directement, soit après y avoir été entraînées par les eaux courantes. D'ailleurs, il n'est guère possible de douter que l'activité volcanique ne s'étende dans le sein de l'Océan, où elle ne se manifeste peut-être pas avec moins d'intensité que sur la terre ferme. La nature même des produits des volcans, aussi bien que leur voisinage si habituel des côtes, paraît, en effet, montrer qu'un lien de parenté les unit à la mer. Les éruptions sous-marines, qui ne se trahissent à nos regards qu'accidentellement, lorsqu'elles atteignent la surface, se

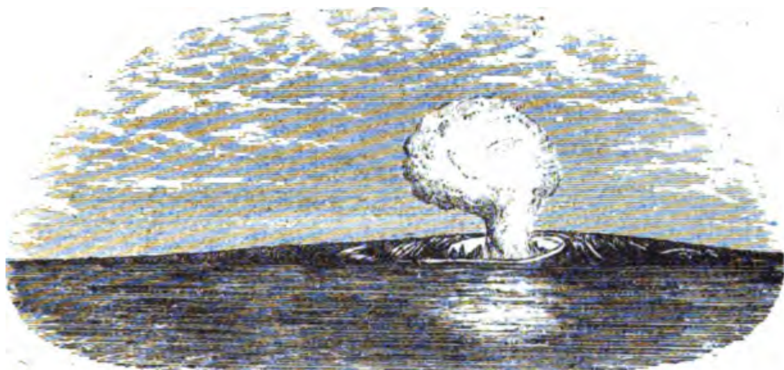


Fig. 154. — Vue de l'île volcanique, de 3 kilomètres de long et de 60 mètres de haut, signalée en novembre 1885, entre l'archipel des Navigateurs et celui des Amis. — D'après M. Wilfred Rowell.

versent alors complètement dans le milieu liquide où elles aboutissent. Un exemple en a été signalé tout récemment en novembre 1885[1], dans l'Océan pacifique, entre l'archipel des Navigateurs et celui des Amis (fig. 154). Dans l'un et l'autre cas, il est certain que la mer reçoit chaque jour, par de nombreux volcans, des matières pierreuses silicatées, telles que les laves, les lapillis, les cendres, ainsi qu'un contingent considérable de substances salines, chlorures, sulfates et autres.

[1] *Proceedings of the Royal Society of London*, t. 40, p. 80, 1886.

Même en dehors du domaine des volcans proprement dits, des failles, telles que celles qui sillonnent, en si grand nombre, l'écorce terrestre, suffisent pour établir des communications entre les parties internes du globe et la surface. Non plus que les volcans, les exhalaisons et les sources qui sortent des failles avec leur cortège de substances minérales ne paraissent pas restreintes aux parties émergées.

Ainsi, à part les substances qui lui sont apportées de la surface, notamment par les fleuves, le bassin de l'Océan sert chaque jour de réceptacle à d'autres, provenant de l'intérieur et concourant également à la formation des dépôts qui s'y opèrent.

Parmi les couches d'origine essentiellement aqueuse, on rencontre çà et là des roches éruptives, massives ou fragmentaires, qui constituent des nappes parallèles aux premières et alternent avec elles; quelquefois ces roches éruptives sont à l'état massif, le plus souvent à l'état fragmentaire ou de conglomérat. Dans toutes les périodes et dans les contrées les plus diverses, nous trouvons des exemples de cette association, qui a autrefois servi d'agument principal aux neptuniens, dans les discussions longues et animées qu'ils soutenaient contre les plutonistes. Elle s'expliqua simplement, lorsqu'on eut découvert, çà et là, des cheminées d'ascension, attestées par des filons et des dykes : on vit, alors, qu'au lieu de s'opérer sur des parties continentales, ces sorties de roches s'étaient souvent faites dans des nappes d'eau, où elles s'étaient étalées et stratifiées à la manière des matériaux de la surface. Ces épanchements se sont quelquefois produits dans des lacs, comme le montrent si bien les nappes de basalte et de trachyte subordonnées aux couches tertiaires de la France centrale. Souvent aussi la mer a eté le théâtre d'éruptions semblables, auxquelles le Vicentin, depuis que Brongniart en a fait connaître la struc-

ture géologique, peut servir de type. A en juger par le grand développement de conglomérats de porphyre feldspathique qui sont subordonnés à certaines couches du terrain triasique et du terrain permien, dans de nombreuses régions du globe, la mer de ces périodes a reçu de grandes éruptions de cette dernière roche[1]. C'est par suite de circonstances semblables que, dans plusieurs pays, les couches inférieures du terrain carbonifère ont été entièrement formées de débris de porphyre. En s'agglomérant solidement, ces débris ont reconstitué des masses qui ressemblent aux porphyres vierges, et sur le mode de formation desquelles ils serait facile de se méprendre, si l'on n'y trouvait des débris de plantes, et parfois même de petits lits d'anthracite : les Vosges méridionales aux environs de Thann, le Roannais, les bords de la Basse Loire, offrent des exemples remarquables de ces porphyres, en quelque sorte régénérés. Dès la période silurienne, on trouve des éruptions de ce genre, par exemple en Bohême et au lac Supérieur. Quelque anciennes que soient ces éruptions siluriennes, elles sont souvent signalées par des couches pulvérulentes, comparées aux cendres des volcans actuels et alternant avec des couches fossilifères, comme l'indiquent très bien les belles coupes du pays de Galles dont on est redevable au *Geological Survey*.

Si les roches éruptives intercalées dans les terrains stratifiés proviennent de parties inférieures à l'écorce granitique, comme il est particulièrement probable pour les roches basiques, elles nous présentent des exemples frappants de contingents fournis à la constitution des terrains stratifiés par ces régions intérieures.

Mais les masses silicatées ne sont pas le seul tribut que

[1] Les trapps interstratifiés dans le trias de New-Jersey, ainsi que ceux de l'Afrique méridionale, dans la province de Natal, peuvent également être rappelés ici.

les régions profondes aient apporté à la mer et aux terrains stratifiés. Des exhalaisons gazeuses et salines ont quelquefois accompagné ces anciennes roches éruptives, comme elles accompagnent celles de l'époque actuelle. Souvent aussi ces exhalaisons sont parvenues isolément à la surface par des failles, à l'instar de ce qui se passe aujourd'hui.

Les émanations de cette seconde catégorie méritent tout particulièrement l'attention, parce que leurs caractères fugitifs ne peuvent toujours les faire reconnaître avec autant de facilité et de certitude que les roches éruptives proprement dites. Elles n'étaient pas dans les mêmes conditions de stabilité que ces dernières ; ainsi, des combinaisons sulfurées, carbonatées et autres, en arrivant dans un milieu liquide, ont dû très souvent se décomposer, de manière à produire des combinaisons nouvelles, pour la plupart insolubles. Pour découvrir plus sûrement les traces de ces apports, il convient donc de ne pas considérer seulement les roches *toutes formées*, telles qu'elles se présentent aujourd'hui à notre observation, mais de remonter aux *corps simples* qui entrent dans leur constitution. Le soufre de la pyrite peut avoir la même provenance que celui des sulfates, et le carbone des carbonates que celui de la houille.

Rien ne prouve plus clairement l'intervention d'émanations souterraines et distinctes des roches éruptives, que les couches des métaux, ainsi qu'on l'a déjà vu, qui se rencontrent à divers étages. Le schiste bitumineux et cuivreux du Mansfeld, avec ses nombreux poissons imprégnés de minerai, qui, malgré sa faible épaisseur, se montre avec les mêmes allures sur des points très distincts, offre un exemple classique de ces gîtes métallifères stratifiés et contemporains des couches auxquelles ils sont subordonnés. Il en est de même des grès du pays de Perm, en Russie, avec leurs troncs d'arbres, eux-mêmes métallisés ; de ceux de la Bolivie, dont

provient le minerai connu dans le commerce sous le nom de Corocoro ; des grès des environs de Commern, en Prusse, où la galène est disséminée en innombrables nodules, comparables, pour la régularité et la grosseur, à du plomb de chasse.

Par la nature et le mode de combinaison des substances qui y ont été introduites, ces couches et un grand nombre d'autres analogues, rappellent tout à fait les filons métallifères. Depuis qu'il est démontré que les filons métallifères ont été remplis de bas en haut par des émanations souterraines, on est en droit de tirer la même conclusion pour ces couches, que leur constitution minéralogique rapproche si étroitement des filons proprement dits. On s'explique facilement le mode de liaison qui existe entre ces deux sortes de gîtes, malgré leur différence de disposition. Au lieu d'incruster des fissures ouvertes dans des masses préexistantes, comme dans le cas des filons, les émanations souterraines ont été apportées jusque dans les couches, pendant leur formation même, c'est-à-dire dans la nappe d'eau où elles se déposaient, et elles s'y sont extravasées. Aussi, dans ce second cas, les minerais auxquels ces émanations donnaient naissance se sont souvent étendus en couches régulières, aussi bien que les dépôts de nature superficielle, avec lesquels on les confondrait nécessairement, si leur nature chimique ne servait parfois à les en distinguer.

Les substances métallifères subordonnées aux arkoses dans beaucoup de parties de la France nous ont offert précédemment des exemples irrécusables de cette liaison de couches avec des filons.

Il faut donc s'attendre aussi à trouver dans les terrains stratifiés des matières non métalliques, telles que celles qui forment les gangues des filons et qui participent à la provenance des minerais métalliques proprement dits.

Tels sont, à part le silicium sur lequel nous reviendrons, le baryum et le strontium. De même que dans les filons, ces deux derniers corps se présentent dans les terrains stratifiés, ordinairement à l'état de sulfate, c'est-à-dire de barytine et de célestine, plus rarement à l'état de carbonate (whitérite et strontianite).

Des couches barytifères se rencontrent dans les étages les plus variés : dans le terrain silurien, comme au Canada ; dans le terrain permien, comme aux environs de Bristol et dans les Vosges ; dans le trias, par exemple à Soultz-les-Bains, en Alsace, où des tiges de plantes du grès bigarré sont moulées en barytine. Le terrain jurassique renferme fréquemment la barytine, non seulement en couches, mais aussi incrustant des fossiles, comme aux environs d'Alençon, de Nancy et de Nontron (Dordogne), à Whitby en Angleterre, et en Franconie. On en rencontre aussi dans le terrain crétacé, par exemple dans les marnes aptiennes de la Drôme. Parmi les localités où la barytine s'est déposée dans les terrains tertiaires, on peut citer les argiles *sgaliose* des environs de Bologne, où elle est accompagnée de célestine, de gypse, de pyrite et de soufre ; le grès des environs de Kreuznach, où elle remplace les plantes, et les couches de Sheppy, en Angleterre.

Quant à la strontiane, elle accompagne la baryte dans plusieurs des gisements qui viennent d'être indiqués, notamment au Canada et aux États-Unis, dans le calcaire silurien du Niagara, où elle est associée à des minerais métalliques ; elle se montre aussi, par exemple, dans le terrain permien du Volga ; dans le trias à différents niveaux, en Lorraine, en Thuringe, dans le Tyrol, à Saint-Cassian, où elle remplace des fossiles ; dans le terrain jurassique (Lorraine, Aarau en Suisse, Hanovre) ; dans le terrain crétacé, comme à Vassy (Haute-Marne), où elle appartient à plusieurs étages. Dans le

terrain tertiaire des environs de Paris, on la rencontre à différents niveaux, depuis l'argile plastique jusqu'aux marnes du gypse. Des couches tertiaires en contiennent également en Sicile, en Espagne (Conilla), à Wieliczka, à Radoboy, en Croatie et en Égypte ; dans plusieurs de ces pays elle est associée à du soufre natif.

Le strontium, dont la présence n'a guère été signalée dans les roches granitiques, se rencontre, au contraire, en quantités assez considérables dans les régions profondes, à en juger par les roches silicatées basiques d'origine éruptive. Ces dernières en contiennent souvent à l'état de sulfate, comme dans le Vicentin, ou à l'état de carbonate, surtout en mélange avec l'aragonite qui en tapisse si fréquemment les géodes et paraît avoir été formée à leurs dépens. Il y a longtemps déjà que l'origine de la strontiane des couches tertiaires du bassin de Paris était rattachée par Alexandre Brongniart à celle que l'on surprend incrustant à Bougival des failles de la craie et jusque dans l'intérieur de silex coupés par elles (fig. 155). En Westphalie, les filons nombreux de célestine qui traversent le terrain crétacé et qu'on y exploite décèlent la même origine.

Pour le baryum, M. Alexandre Mitscherlich a découvert ce fait intéressant, qui avait échappé antérieurement aux auteurs d'analyses, qu'il se trouve en quantité notable dans certains feldspaths ; ceux dans lesquels l'existence du baryum a été signalée appartiennent principalement à des roches éruptives. C'est de ces masses intérieures que les deux corps dont il s'agit paraissent avoir été amenés vers la surface, dans les roches stratifiées aussi bien que dans les filons, à la manière des métaux proprement dits. D'ailleurs, les sources thermales, comme celles de Carlsbad, en Bohême, et de Lamalou, dans le département de l'Hérault, déposent encore actuellement de la barytine à l'état cristallisé.

que dans divers gîtes de la Suède[1], est également un fait très significatif.

Les grandes masses récemment découvertes au Groënland, à Ovifak, sont particulièrement instructives à ce point de vue; car l'une d'elles a indiqué à l'analyse[2], sur 100 parties, 3,00 de carbone combiné, et 1,64 de carbone libre, soit 4,64 en tout. Comme la densité en est de 5,8, cette roche, dans un mètre cube, ne renferme pas moins de 271 kilogrammes de carbone. Par conséquent, une couche d'une telle roche ferreuse, ayant seulement 5 millimètres d'épaisseur, renfermerait autant de carbone que toute une colonne de l'atmosphère ayant même base. Pour une variété de fer renfermant le carbone en proportion 1,000 fois moindre, il suffirait d'une couche de 5 mètres, c'est-à-dire bien peu épaisse, pour l'équivalent dont il s'agit.

Ce qu'il est entré de carbone dans les terrains stratifiés à partir de la période silurienne, ou même seulement depui l'époque de la formation de couches où l'on trouve des animaux à respiration aérienne, est si considérable, par rapport à celui de notre atmosphère, qu'il est bien difficile de supposer que ce carbone, aux époques reculées dont il s'agit, se trouvait entièrement, soit dans l'air à l'état d'acide carbonique, soit dans la mer au même état ou à celui de carbonate. Il répugne également d'admettre que ce corps ait pu être fourni en telle quantité par l'assise primordiale, qui, dans toutes les parties du globe, en renferme une si faible proportion. D'ailleurs, s'il en avait été ainsi, ce corps n'aurait sans doute pas été cédé aux couches anciennes avec moins d'abondance qu'aux couches plus récentes, ce qui n'a

[1] Mémoire sur les dépôts métallifères de la Suède et de la Norvège. *Annales des Mines*, 4e série, t. IV, 1843, p. 224, 330 et 260.

[2] *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXXVI, p. 1541. 1878.

pas lieu, particulièrement en ce qui concerne le carbone fixé à l'état de carbonate.

Une partie du carbone que contient si abondamment la série des terrains stratifiés paraît donc avoir été fournie par les régions profondes du globe. De même que nous venons de le reconnaître pour le phosphore et pour d'autres corps, les exhalaisons carbonées se seraient produites pendant les diverses périodes, avec des abondances très variables, et seraient arrivées successivement dans la mer et dans l'atmosphère [1].

D'après les données que fournissent les roches éruptives, on est amené à supposer que sous l'enveloppe granitique, qui a des milliers de mètres d'épaisseur, se trouvent des masses silicatées d'une nature différente, et en même temps plus denses, où abondent le calcium, le magnésium, le fer, le phosphore : les émanations sulfurées et carbonées qui ont accompagné la sortie de ces roches apprennent de plus que le soufre et le carbone ne manquent pas dans ces réservoirs profonds.

D'un autre côté, les notions apportées par les météorites relativement à la constitution intérieure de corps célestes, qui présentent la plus grande analogie avec les parties internes du globe terrestre, confirment et complètent les conclusions auxquelles nous venons d'être conduit quant à la nature des masses infragranitiques.

Toutes les météorites renferment du soufre et du phosphore, à l'état de sulfure et de phosphure.

Le carbone se trouve aussi dans les météorites, non seulement dans celles qui sont désignées sous le nom de char-

[1] C'est principalement à l'état *complètement brûlé* ou d'acide carbonique que le carbone se trouve, tant à la surface que dans l'écorce du globe. Les combinaisons combustibles sont en quantité comparativement faible. Une observation semblable s'applique au soufre et à l'hydrogène sulfuré par rapport aux sulfates.

bonneuses, où ce corps est, pour ainsi dire, visible, et qui en renferment parfois au delà de 5 pour 100, comme celle d'Orgueil, Tarn-et-Garonne, mais aussi dans les fers météoriques ou holosidères.

Ce que l'on voit chaque jour dans les ateliers métallurgiques, où s'élaborent la fonte et l'acier, sur la facilité avec laquelle le carbone s'associe au fer à des températures élevées, explique la présence de ce corps dans les fers natifs qui nous arrivent des espaces. On peut donc admettre que les masses de fer qui paraissent constituer les régions profondes du globe terrestre [1] ne sont pas dépourvues de carbone combiné ou libre, et qu'elles peuvent ressembler aussi, sous ce rapport, aux météorites.

De plus, les roches de fer d'Ovifak nous montrent qu'après avoir fixé du carbone dans des circonstances dont j'ai tenté de rendre compte ailleurs, les mêmes roches peuvent l'abandonner à l'état d'acide carbonique ou à celui d'oxyde de carbone, par exemple sous l'influence d'une oxydation ou sous celle d'un simple échauffement, comme il arrive pour certains produits obtenus dans des expériences de MM. Stammer et de Gruner.

Sans qu'il soit nécessaire d'entrer dans plus de détails, on comprend comment ces faits jettent de la lumière, non seulement sur les causes qui ont pu fixer du carbone dans les profondeurs de notre globe, mais aussi sur certains procédés par lesquels il peut s'en exhaler.

Il y a lieu, maintenant, de se demander comment les masses infragranitiques ont pu envoyer à la surface un tel contingent de substances, puisque, déjà au commencement de la période silurienne, elles étaient complètement enveloppées par une écorce épaisse de roches.

[1] *Bull. Soc. géol.*, 2e série, t. XXIII, p. 414, 1866.

Ces apports se sont faits au moins par deux procédés différents.

D'abord, à toutes les époques et sur de nombreux points, des roches silicatées ont été poussées en dehors sous forme éruptive. Elles ont ainsi apporté, incorporés dans leur pâte même, des corps qui ont pu s'en séparer plus tard, à la suite d'une décomposition, et produire, d'une part, des argiles, d'autre part, des combinaisons telles que des carbonates de chaux[1] et de magnésie, ainsi que de l'oxyde de fer; de l'acide phosphorique a dû être mis aussi en circulation de cette manière. La formation de la glauconie se rattache peut-être à des actions de ce genre, aussi bien que celle de la terre verte, ou céladonite, qui s'est déposée avec des zéolithes dans les cavités des roches éruptives amygdaloïdes.

Cependant il ne faudrait pas exagérer l'importance de ce mode *direct* d'intervention. Les roches éruptives, quoique formant d'innombrables pointements à travers l'écorce terrestre, ne constituent réellement, au moins à la surface, que des accidents fort restreints par rapport aux terrains stratifiés. On peut le reconnaître avec une carte d'Europe sur laquelle ont été marquées les roches de cette première catégorie, et où l'on voit que de vastes régions, comme la Russie, en sont à peu près dépourvues[2].

Mais, sans paraître au dehors, les masses profondes ont envoyé des extraits de leur substance jusqu'à la surface, tant à l'état gazeux qu'en dissolution, comme elles en en-

[1] Le calcaire de formation récente, connu aux îles Canaries sous le nom de *Tosca*, paraît donner un exemple de ce mode de production. Il en est de même des récifs de polypiers qui sont juxtaposés aux massifs volcaniques dans beaucoup de parties de l'océan Pacifique.

[2] Il faut toutefois observer : d'une part, que beaucoup d'anciennes éruptions nous sont cachées par les terrains sédimentaires qui les recouvrent, et, d'autre part, que la mer a pu porter les produits de la décomposition de certaines roches bien loin de leur point de départ.

voient encore chaque jour par les exhalaisons volcaniques et les sources thermales ; des émanations analogues se sont produites pendant les anciennes périodes, notamment dans le remplissage des filons métallifères.

Ces filons, si nombreux dans une foule de régions disloquées de l'écorce terrestre, avec leurs sulfures, leurs carbonates, leurs phosphates, nous montrent, pour ainsi dire, les corps qui nous occupent surgissant des régions profondes, aussi bien que les métaux proprement dits : il nous apprennent à la fois quelle est la patrie originelle de ces diverses substances, et comment elles ont pu émigrer vers la surface.

Les filons proprement dits ont, en général, rempli des fissures dans des roches préexistantes ; mais il est des cas où l'on voit les substances qui les constituent s'épanouir dans des couches régulièrement stratifiées et même fossilifères, ainsi qu'on l'a exposé à propos de la liaison des filons avec les dépôts métallifères. Ce trait d'union entre deux modes de dépôts, en apparence si différents, dont les strates liasiques et jurassiques présentent des exemples nombreux et bien caractérisés sur les contours du plateau central de la France, a été constaté aussi pour certaines combinaisons pierreuses, telles que la barytine et la fluorine. Ainsi, pendant que certaines couches se formaient, elles ont pu recevoir des émanations semblables à celles qui, ailleurs ou même dans leur voisinage, ont incrusté les filons. De simples failles ont donc suffi pour établir une communication entre les régions profondes et le fond des mers ; les canaux d'ascension sont encore reconnaissables, lorsque des incrustations permanentes s'y sont produites.

En Alsace, la baryte sulfatée cristallisée se rencontre dans quelques paraclases et de nombreuses lithoclases, qui traversent le Kronthal (Voir plus haut la figure 166). Elle est accompagnée de chaux carbonatée cristalline et d'hématite

brune[1]. Le grès du Kronthal, ordinairement de couleur rouge, a en général une teinte claire près des épanchements de baryte sulfatée. Non loin de la faille qui avoisine la tuilerie, les veines de baryte sulfatée pénètrent jusque dans le grès bigarré et le muschelkak, ce qui montre que l'arrivée de cette substance, ainsi que la formation des failles du Kronthal, sont postérieures au trias. Le calcaire gris du muschelkalk, qui renferme des mouches de baryte sulfatée, à l'ouest de Marlenheim, ne présente pas d'altération.

Les cas où l'on voit les couches se rattacher aux filons par une sorte d'extravasement, et où l'on surprend ainsi certains corps arrêtés et comme figés dans leur trajet ascendant, deviennent de plus en plus nombreux, à mesure qu'ils sont plus soigneusement recherchés. Toutefois, on est loin de constater d'une manière générale ce genre de relation, même pour des gîtes dont la composition atteste la provenance aussi clairement que les couches de schistes cuivreux de Thuringe, les amas de calamine et de galène qui, en Silésie, sont superposés au muschelkalk, et les dépôts de soufre natif de la Sicile.

On conçoit qu'il doive en être ainsi.

D'une part, les failles d'ascension n'ont pas toujours été mises à nu par des échancrures, des déchirements ou des érosions; le plus souvent elles restent cachées dans l'intérieur des roches. On serait tout autrement renseigné, si l'œil pouvait plonger à travers les couches superposées qui cachent ces cassures profondes.

D'autre part, les émanations, une fois arrivées dans la mer, ont pu s'étendre à une grande distance des orifices qui les avaient amenées, sans que leur canal puisse, par con-

[1] *Géologie du Bas-Rhin*, p. 328 et 396, 1852.

séquent, être reconnu à proximité des couches à la formation desquelles elles ont contribué.

En outre, il est un fait qu'on ne doit pas perdre de vue : dans bien des cas, des failles peuvent avoir donné issue à d'énormes quantités de substances en dissolution, sans avoir été incrustées. A Bagnères-de-Luchon, par exemple, les galeries que l'on a pratiquées pour le captage permettent d'observer parfaitement dans le granite de nombreuses fissures, à travers lesquelles jaillissent les sources. Ces fissures n'offrent aucun dépôt, au moins dans leurs parties visibles; leurs parois n'ont pas même été sensiblement altérées, après un parcours si prolongé. Elles sont d'ailleurs si minces, que, si ces sources tarissaient aujourd'hui, il ne resterait aucun vestige de leur existence; rien n'annoncerait qu'il est sorti sur ce point, et pendant des siècles, d'énormes quantités d'eau et de substances minérales.

Des circonstances spéciales ont été nécessaires pour que les sources thermales et les exhalaisons souterraines produisissent des dépôts permanents et incrustassent les fissures qui leur donnaient issue. La diminution de température et de pression qui se produisait aux abords de la surface a dû souvent y contribuer. Mais lorsqu'il ne s'est pas opéré de dépôts sur leurs parois, ces fissures ne peuvent nous apprendre si elles ont servi de voies de communication avec l'intérieur; elles restent muettes à ce point de vue. Parmi les failles innombrables qui coupent l'écorce terrestre, il en est donc beaucoup qui ont pu remplir ce rôle, sans en présenter de preuves, même dans les lieux où l'exploration en est possible.

Ce qui vient d'être dit sur les sources thermales actuelles, qui débitent d'énormes quantités de matières dissoutes sans en laisser de traces sur les fissures qui les amènent, peut expliquer également comment les substances que nous

voyons dans les filons sont si peu abondantes par rapport à celles qui constituent les couches et qui paraissent être l'origine analogue. Beaucoup de corps ont pu passer par les failles, sans s'y fixer à l'état insoluble ; ils ont été portés au dehors, et s'y sont épanchés, peut-être en bien plus grande quantité qu'ils ne s'y sont arrêtés. Ainsi la chaux y serait peut-être moins rare, si elle avait pu former des combinaisons aussi insolubles que la baryte.

On a aussi objecté que les sources calcarifères jaillissant du granite, comme celles de Saint-Nectaire ou de Carlsbad, sont aujourd'hui peu nombreuses. On verra plus loin que cette objection n'a pas la valeur qu'on lui a attribuée.

A l'appui des considérations qui précèdent, sur le mode d'apport de certains corps qui entrent dans la constitution des terrains stratifiés, prenons comme exemple le fer, celui des métaux usuels qui est le plus abondamment représenté dans les terrains stratifiés, ainsi que dans les roches silicatées, cristallisées et éruptives. La simple décomposition, à la surface du sol, de ces dernières, surtout des roches amphiboliques et pyroxéniques qui sont sorties à diverses époques, a pu isoler des oxydes et autres combinaisons de fer en quantité notable. Certains minerais de fer du Nassau, de la Westphalie, du Harz et de l'Irlande, qui sont juxtaposés à des roches pyroxéniques, ont pu être attribués à des influences de cette catégorie. L'abondance surprenante avec laquelle les fossiles sont souvent accumulés dans certaines couches de minerai de fer, a conduit aussi à assigner à ces dernières une origine purement superficielle, analogue à celle du *minerai des prairies et des lacs*. Tel a, autrefois, semblé être le cas pour les gîtes de minerai pisolithique, qui, pendant la période tertiaire, se sont déposés abondamment dans diverses parties de la France ; car ils occupent souvent la surface du sol, sans être recouverts par des cou-

ches régulières, d'où leur est venu le nom vulgaire de minerai d'alluvion. D'ailleurs la forme globulaire qui les caractérise appartient également à des minerais qui se précipitent actuellement dans des lacs de la Suède et de la Finlande.

Cependant beaucoup des couches et amas de minerai de fer dont il s'agit sont éloignés de tout affleurement de roches éruptives, et l'on ne comprend pas, par exemple, comment s'y rattacheraient les minerais pisolithiques du Berry et de la Lorraine, qui se sont déposés dans des bassins entièrement fermés et constitués de calcaire jurassique. D'ailleurs la présence, dans plusieurs de ces gîtes, de quartz jaspe et de quartz hyalin cristallisé, qui ont été visiblement produits en même temps que le minerai, suffirait pour faire repousser une telle assimilation. Sur d'autres points, c'est l'oligiste cristallisé, comme à Lunel (Aveyron) ou à la Voulte (Ardèche), la sidérose spathique, la pyrite cristallisée, la blende, la barytine en cristaux nets et limpides, par exemple à la Voulte, qui servent à rattacher le mode de formation des couches ferrifères à celui des filons. A cette occasion, on peut également rappeler le fer titané en cristaux, que Berthier a découvert dans le minerai magnétique des couches néocomiennes de la Champagne, ainsi que l'oxyde de titane cristallisé, de l'espèce anatase, que Wöhler[1] a signalé dans le minerai jurassique et fossilifère du Cleveland, exploité si activement dans le nord de l'Angleterre.

Le gisement du strontium et du baryum dans les terrains stratifiés, dont il a été question plus haut, fournit également, sur une foule de points, des preuves d'intervention semblable des sources thermales.

De même le calcium, dont on connaît les analogies avec le baryum, le strontium et le fer, a pu arriver des régions

[1] *Leonhards Jahrbuch*, 1868, p. 202.

profondes par des failles invisibles, par exemple en Auvergne, où les travertins calcaires ont commencé à se déposer dans un bassin granitique, et antérieurement à l'arrivée des basaltes.

Enfin l'examen des conditions dans lesquelles se présente l'acide silicique ou quartz conduit à une conclusion analogue.

Une partie du quartz qui abonde dans les terrains stratifiés leur a été fournie, comme on l'a vu, aux dépens de l'assise granitique; mais ce n'est pas le cas de la totalité, même sans compter les couches de silex. On a vu combien les filons de quartz sont développés dans certaines contrées formées de roches anciennes. En France, le Morvan et le plateau central, dans toutes ses parties, offrent des exemples de ces épanchements considérables, comme on en retrouve dans le Böhmerwald et dans bien d'autres pays. Les filons dont il s'agit ne sont pas de simples sécrétions des roches encaissantes[1]. Ils sont à assimiler, pour leur origine, aux filons métallifères, avec lesquels ils présentent fréquemment des passages insensibles, en montrant çà et là des minerais métallifères. C'est ainsi qu'aux environs d'Alban (Tarn) et de Kaimar (Aveyron), ils renferment des colonnes de minerai de manganèse, de minerai de fer et de barytine, et que le puissant filon de quartz de la Sierra-Nevada de Californie, que l'on peut suivre sur une longueur de 120 kilomètres et sur une épaisseur de 2 à 20 mètres, ne s'est allié d'or que sur quelques places; il se montre stérile sur une grande partie de son étendue[2].

[1] Les phyllades appartenant aux terrains anciens sont très fréquemment sillonnés par des veines irrégulières de quartz hyalin. Ces dernières diffèrent, en général, des filons, en ce qu'elles paraissent des produits de la sécrétion de la roche voisine, engendrés sous l'influence de l'action métamorphique : aussi ne sont-elles à mentionner ici que pour mémoire.

[2] Laur, *Annales des Mines*, 6e série, t. III, p. 386.

Quand, au lieu d'aboutir à une région émergée, des épanchements semblables à ceux auxquels les filons doivent leur remplissage ont débouché dans une nappe d'eau marine ou lacustre, ils ont nécessairement pris d'autres caractères; ils se sont étalés de diverses manières. On a un exemple de ce contraste dans la formation du quartz corné qui imprègne les arkoses en beaucoup de lieux, autour du plateau granitique de la France ; d'après son association avec les filons quartzeux du voisinage, on a admis depuis longtemps que ceux-ci représentent comme des cheminées, par lesquelles le quartz a été apporté dans ces couches au moment où elles se déposaient; il y est arrivé en compagnie d'autres substances, la fluorine, la barytine ou la galène.

Mais, comme on vient de le voir, les conditions qui mettent ainsi sous les yeux de l'observateur une relation entre les deux modes de dépôts se présentent rarement, et bien des couches quartzeuses situées à divers niveaux, quoique n'offrant pas cet indice, ont pu être produites d'une manière comparable aux filons, c'est-à-dire par d'anciennes sources thermales. Telle est l'origine que paraissent avoir beaucoup de couches de silex, comme celles que l'on rencontre parfois dans le terrain jurassique, bien plus fréquemment dans la craie blanche, ainsi que les meulières du bassin de Paris, notamment le travertin siliceux de Champigny. Depuis longtemps, on a expliqué cette formation de la manière la plus simple et la plus satisfaisante, en admettant que des sources contenant de la silice en dissolution se sont épanchées dans les bassins où se formaient ces couches.

Diverses particularités viennent à l'appui de cette manière de voir : ainsi, dans le département de l'Indre, au sud de Saint-Gaultier, des dépôts siliceux, en se superposant au calcaire jurassique, se sont substitués partiellement à cette dernière roche; ils en ont moulé en creux les coquilles et

les polypiers qui y abondent et qui, par une sorte de dissection, sont devenus plus reconnaissables que dans la masse où ils étaient primitivement empâtés ; ils lui ont, de plus, emprunté sa structure oolithique. On ne peut guère douter que le liquide qui déposait l'acide silicique n'ait, en même temps, dissous le carbonate de chaux et n'ait ainsi produit ces substitutions ou épigénies significatives. A quelques mètres de là, le dépôt offre un tout autre aspect : l'acide silicique est à l'état de jaspe jaune et passe, plus loin, à un minerai de fer très quartzeux.

Le quartz qui s'est formé dans les roches stratifiées n'est pas toujours dépourvu de cristallisation distincte, comme dans les variétés désignées sous les noms de silex et de jaspe. Il s'y produit aussi à l'état hyalin et, parfois, en cristaux qui ne laissent rien à désirer pour la netteté et la limpidité, par exemple dans des géodes de rognons ou de polypiers silicifiés. Des cristaux très élégants de quartz, que renferment les collections de minéralogie, par exemple ceux de Rémusat dans la Drôme, ou ceux qui sont qualifiés de diamants du Niagara, démontrent que l'acide silicique a parfois trouvé dans des terrains stratifiés des circonstances aussi favorables à sa cristallisation que dans les filons métallifères.

L'association de certains sables à des gîtes métallifères de la Belgique a depuis longtemps conduit d'Omalius à y voir un dépôt analogue à celui des filons. Parmi les couches de sable quartzeux ou de grès, il en est encore d'autres que rien n'autorise, non plus, à considérer comme des débris de démolition qui se seraient produits à la surface. Ainsi, en pulvérisant le quartz du granite, on n'obtient pas, en général, de sable limpide et incolore, comme celui que l'on exploite, par exemple, à Rilly près d'Épernay, pour les cristalleries.

Les grains de divers sables, qui, au premier abord, parais-

sent terminés par des faces planes et former des cristaux, sont réellement fragmentaires et comparables à du verre pilé. Toutefois un examen attentif, aidé de la loupe ou du microscope, a fait aussi reconnaître l'existence de sables réellement en cristaux, souvent complets; ils ne doivent pas résulter de la trituration des roches granitiques, roches dans lesquelles les grains de quartz ne sont pas généralement terminés par des faces cristallines[1].

Il existe aussi des sables grossiers, à grains tout à fait arrondis, dont la forme globulaire et lisse ne paraît pas devoir être attribuée au résultat de frottements[2]. La formation des sables de cette dernière variété aurait plutôt de l'analogie avec celle des globules de quartz qui se sont produits à la partie supérieure du calcaire grossier du bassin de Paris, notamment dans les couches appelées *caillasses*, et à l'intérieur de géodes. Ces globules, les uns à surface cristalline et drusique, les autres à surface lisse, donneraient un exemple de quartz qui s'est granulé, indépendamment de toute action mécanique.

On serait ramené ainsi, par des observations de plusieurs sortes, à une idée anciennement émise sur l'origine des sables quartzeux[3], par Deluc et par de Saussure, et qu'on a repoussée peut-être d'une manière trop absolue. Si beaucoup de sables résultent de la trituration du granite et d'autres roches silicatées quartzifères, il en est, de formes diverses, cristallins, globulaires, ou même fragmentaires, qui peuvent être dus, soit à une précipitation directe de l'acide silicique, soit à un apport de l'intérieur.

[1] Recherches expérimentales sur la formation des sables, *Annales des Mines*, 5e série, t. XII, 1857.
[2] Même mémoire, p. 555.
[3] Voigt, *Journal des Mines*, t. XXXVIII, p. 21. — Gerhard, *Mémoires de l'Académie de Berlin*, 1816, 1817.

C'est habituellement à l'état anhydre que l'acide silicique s'est précipité dans les terrains stratifiés, comme quartz hyalin ou comme quartz silex. Il se rencontre bien plus rarement hydraté, constituant l'espèce opale. Les rognons de ménilite du terrain tertiaire des environs de Paris et de l'Auvergne, le tripoli de la Bohême, la gaise du grès vert des Ardennes, à laquelle on commence à reconnaître un développement considérable [1], offrent des exemples de ce second mode de dépôt.

La prédominance de l'état anhydre sur l'état hydraté dans des dépôts d'acide silicique évidemment formés dans l'eau, comme les meulières et comme bien d'autres couches de silex régulièrement stratifiées, constitue un fait très digne de remarque. On sait, en effet, que ce résultat ne peut être atteint dans les conditions ordinaires des laboratoires, même lorsqu'on opère à la température de 100°. L'acide silicique ainsi précipité entraîne toujours de l'eau de combinaison, qu'il conserve indéfiniment, lors même qu'il se dessèche après avoir été séparé du liquide. Ce n'est qu'en opérant à des températures bien supérieures à 100°, et par conséquent en vases clos et sous pression, que l'on est parvenu à obtenir, par voie humide, de la silice anhydre; dans ces conditions, elle se produit en cristaux identiques avec ceux de la nature. Sans prétendre aucunement que le quartz ne puisse cristalliser à des températures bien moindres que celles où il a été obtenu dans les expériences de Sénarmont et dans les miennes, il est difficile d'admettre, jusqu'à preuve du contraire, qu'il ait pu se former de toutes parts et cristalliser nettement, dans les terrains stratifiés, à la température ordinaire, c'est-à-dire sans le secours d'une certaine éléva-

[1] On sait que c'est Sauvage qui, le premier, en a fait connaître l'existence et la nature. *Annales des Mines*, 3e série, t. XVIII, 1840; t. XX, 1841.

tion de température, qui rappelle elle-même l'intervention de l'activité interne du globe.

Quand on rapproche ainsi, par l'origine, certaines substances des roches stratifiées de celles des filons, les ressemblances ne se manifestent pas toujours aussi clairement que pour certaines couches métallifères. Les analogies se cachent ordinairement sous des différences dans le mode de cristallisation et même de composition. Ainsi les cristaux nets et limpides de strontiane sulfatée qui tapissent les failles de Bougival ont si peu l'aspect des masses compactes et pierreuses qui se trouvent en rognons dans les couches tertiaires, qu'il faut des faits positifs pour reconnaître le lien qui unit les deux modes de gisement. L'apatite des filons comparée avec la phosphorite qui s'est épanchée à la surface dans le département du Tarn-et-Garonne, dans le Nassau ou à Amberg en Bavière, et dans le sud même de l'Espagne, présente une différence non moins marquée. La calcite en cristaux de forme si variée, que l'on rencontre dans les filons, par exemple en Derbyshire, donne lieu à des observations de même nature.

L'examen comparatif d'un même filon métallifère dans ses parties profondes et dans ses parties superficielles rend compte de ces différences, ainsi que d'autres du même genre. Les combinaisons oxydées de la surface y contrastent avec les combinaisons sulfurées des mêmes métaux qui se trouvent plus bas. Bien que les actions actuelles de l'air et de l'eau contribuent à produire des décompositions, cet état paraît souvent remonter à l'époque même du remplissage des gîtes. Les chromates et vanadates de plomb de Berezowsk, dans l'Oural, et l'étain concrétionné (woodtin) du Cornouailles ne s'expliqueraient guère autrement. Rien n'est plus instructif à ce point de vue que les gîtes de calamine, comme ceux de la Belgique, où le zinc en s'oxydant s'est

combiné à l'état de silicate hydraté et de carbonate, tandis que, plus profondément, il est à l'état de sulfure ou de blende. Ces oppositions seraient sans doute bien plus caractérisées encore et plus fréquemment observables, si les affleurements originels des gîtes, au lieu d'avoir été emportés, s'étaient intégralement conservés.

En se précipitant dans un espace clos, comme un filon, les substances minérales se trouvaient dans des conditions spéciales de milieu, de température et de pression, dont diverses expériences ont pu faire apprécier toute l'importance. Jusqu'à présent on n'a pu, en effet, faire cristalliser la plupart des minéraux des filons, particulièrement le quartz, la sidérose et la pyrite, qu'en opérant dans des tubes fermés et sous pression.

A plus forte raison, lorsqu'au lieu d'incruster les fissures étroites qui sont devenues des filons, les émanations, vapeurs ou sources thermales se sont épanchées dans une nappe d'eau superficielle, c'est-à-dire à une température et sous une pression moindres, et en contact avec l'oxygène atmosphérique. Elles ont rencontré des circonstances bien différentes, et l'on ne peut s'étonner de la différence qui, en général, fait distinguer, à la première vue, le quartz des terrains stratifiés de celui des filons, lors même que l'un et l'autre paraissent avoir une origine semblable [1].

Toutefois, il est des termes intermédiaires qui permettent de rapprocher les extrêmes. Telles sont certaines dolomies

[1] Il y a même des cas où une simple différence dans l'épaisseur de la nappe d'eau paraît avoir exercé une influence très notable sur l'aspect du dépôt. C'est peut-être à une circonstance du même genre qu'il faut attribuer, en partie, la différence de texture que présentent le minerai de fer pisolithique déposé dans des flaques d'eau peu profondes, à la surface des continents, et le minerai oolithique du terrain jurassique formé dans la mer ; il en est de même du calcaire d'eau douce avec tubulures, rappelant tout à fait le travertin des sources, quand on le compare à certains calcaires qui paraissent dus à un précipité chimique opéré dans l'Océan.

métallifères. Par exemple, la dolomie, qui forme des couches minces à la base du grès des Vosges, renferme, à Robache près Saint-Dié, de nombreuses géodes cristallisées, dans lesquelles se montrent le quartz, la barytine, la fluorine, l'oligiste, tous également en cristaux[1]. Elle offre ainsi, dans sa composition minéralogique, des traits de ressemblance frappants avec les amas de Framont, bien connus des minéralogistes, qui en sont distants de 24 kilomètres. Le même ensemble de minéraux s'est donc produit dans une dolomie stratifiée et dans des amas juxtaposés à un pointement de porphyre.

Ainsi les observations de diverses natures qui viennent d'être exposées s'accordent pour faire reconnaître que bien des substances qui constituent des couches régulières dans les terrains stratifiés ont été cependant apportées de la profondeur.

Ces apports considérables ont eu lieu, tantôt, par les roches éruptives elles-mêmes, tantôt, comme dans le remplissage des filons, par des émanations en vapeurs ou en dissolution. Toutefois on ne peut toujours observer une corrélation entre les couches et les failles qui ont servi de canaux d'émission. D'ailleurs les émanations, au lieu d'opérer des dépôts sur place et directement, ont pu provoquer à distance de leur sortie et indirectement, de même que, dans certaines circonstances, l'hydrogène sulfuré détermine la formation du gypse.

Non seulement les considérations qui précèdent expliquent la formation de certaines roches, elles sont aussi d'accord avec l'un des caractères généraux les plus remarquables que présentent les terrains stratifiés, c'est-à-dire avec les changements brusques que l'on constate dans une série de cou-

[1] Comme l'a montré le docteur Carrière, de Saint-Dié, minéralogiste très distingué.

ches, lorsqu'on les suit normalement à leur plan sur de grandes épaisseurs.

Aux environs de Paris, la succession de la craie, de l'argile plastique du calcaire grossier et des couches gypseuses offre un exemple bien connu de ces différences. Nous venons d'en signaler d'autres, non moins caractérisées, dans l'apparition, à certains étages bien déterminés, de minerais métalliques, de phosphates et d'autres substances.

Ce ne sont pas seulement des couches isolées, mais des groupes entiers de couches, qui offrent, dans leurs roches prédominantes, des différences bien prononcées et s'étendant souvent sur de vastes distances. Les terrains triasique et permien, avec leurs roches arénacées puissantes et souvent rougies par le peroxyde de fer, leurs amas fréquents de sel gemme, les gîtes métallifères que l'on y exploite en beaucoup de lieux, dénotent, au moins pour l'ensemble de l'Europe, un régime bien différent, d'une part, de celui qui a précédé, pendant que le terrain houiller se formait; d'autre part, de celui qui a suivi, lorsque, dans la période jurassique, des dépôts calcaires se faisaient si abondamment et que des récifs de polypiers, avec d'innombrables animaux secrétant du carbonate de chaux, acquéraient un si grand développement. Dans certains étages, c'est le silicate de protoxyde de fer et d'autres bases, connu sous le nom de glauconie, qui, par le mélange intime de ces grains verts, est venu teindre toutes les couches, quelle qu'en soit la nature, sableuse ou calcaire.

On sait d'ailleurs qu'au milieu de ces variations, des récurrences des mêmes roches se reproduisent parfois avec des identités surprenantes. Ces retours sont particulièrement remarquables pour les formations adventives, telles que le sel gemme, qui se montre dans le trias avec le même cortège que dans les couches siluriennes de l'Amérique du Nord

ou dans les terrains tertiaires de l'Italie, des Carpathes et du Caucase. Il en est de même pour les groupes de couches qui avoisinent les combustibles minéraux d'âges très différents.

Les changements dont il s'agit avaient déjà fortement fixé l'attention de Lavoisier, dans le mémoire géologique que fit cet illustre savant sur les environs de Paris. On les a attribués d'abord à de simples modifications dans la disposition relative des continents et des mers, et, par suite, dans celle des fleuves et des courants marins sous l'influence desquels se formaient les sédiments.

Mais, si l'on ne voyait dans les terrains stratifiés que des effets d'actions superficielles, il serait bien difficile, si ce n'est impossible, de comprendre beaucoup de faits de cet ordre, qui, au contraire, paraissent se rattacher de la manière la plus directe à l'intervention d'actions souterraines. Les changements qui se sont produits dans l'intérieur du globe sont attestés, non seulement par des phénomènes mécaniques de fractures et de dislocation, mais aussi par l'apparition, après des périodes de calme, de roches éruptives de diverses natures.

Les variations que présentent les remplissages successifs des filons métallifères sont encore plus significatives. Tous les mineurs savent que les filons qui traversent une même contrée, et dont les rejets successifs servent à constater avec certitude l'âge relatif, diffèrent généralement par la nature des substances pierreuses et métalliques qui s'y sont déposées. De même, les émanations analogues à ces dernières, qui ont apporté leur tribut à la formation des roches stratifiées, ont varié avec le temps; certaines d'entre elles ont tari et ont fait place à d'autres. Dans l'Aveyron, où d'épaisses couches de grès sont teintes en rouge intense par le peroxyde de fer, le gneiss qui supporte ces couches est traversé, no-

tamment près de Rodez, par de petits filons d'oligiste et de quartz, qui donnent une explication claire du phénomène. On comprend ainsi comment des phases ferrugineuses ont succédé à des phases calcaires ou siliceuses, et d'où proviennent ces particularités minéralogiques qui impriment souvent une physionomie caractéristique, non seulement à de simples assises, mais à des étages et à des terrains entiers. Aux phénomènes généraux et constants qui sont de tous les temps, se sont superposés, en quelque sorte, *des règnes* de certaines substances ou de certaines actions qui ont affecté des étendues considérables. Les mouvements qui, à toutes les époques, ont déformé, bosselé ou ridé l'écorce terrestre, ont sans doute ouvert, fermé ou modifié les fissures de communication qui servaient à l'apport des substances profondes, et contribué ainsi aux changements dont il vient d'être question.

En présence de telles variations, il est clair qu'on ne saurait prétendre trouver aujourd'hui la continuation complète et uniforme de tous les phénomènes qui nous ont précédés. Il ne reste plus rien des sources ferrugineuses qui, pendant la période tertiaire, ont apporté le minerai pisolithique dans tant de régions de la France, ni des sources siliceuses qui, plus tard, ont produit des couches de meulières sur des étendues non moins considérables. Ainsi l'origine que nous venons de reconnaître comme la plus vraisemblable pour le calcaire des anciennes périodes n'est aucunement en opposition avec la rareté comparative, au moins sur nos continents, de sources thermales apportant le carbonate de chaux des régions infragranitiques.

L'importance que l'on est amené à reconnaître aux actions internes montre aussi à combien de causes de changement la mer a dû être soumise, pendant les longues périodes qui correspondent à la formation des terrains stratifiés. Les va-

riations que nous venons de rappeler dans la succession des terrains sont comme le reflet de ces influences.

Selon l'hypothèse généralement admise, lorsque l'écorce silicatée s'est refroidie et consolidée, et que l'eau s'est elle-même condensée et a formé un océan liquide, diverses substances volatiles, telles que le chlorure de sodium, qui avaient pu d'abord rester en vapeurs, se sont dissoutes dans la mer. Quelle qu'en ait été la salure originelle, l'Océan n'a pas cessé de servir de réceptacle, d'une part, à des émanations volcaniques et thermales, d'autre part, à des substances salines apportées par le lavage des parties externes de l'écorce solide. On sait, en effet, que l'eau des fleuves n'est jamais chimiquement pure ; depuis qu'il y a des continents, les eaux qui les arrosent apportent donc journellement, à part les matières pierreuses qu'elles tiennent en suspension, des substances réellement dissoutes, qui proviennent du lavage des roches[1].

Si, depuis des époques reculées, la mer a beaucoup reçu, elle a aussi fourni abondamment, soit en livrant aux êtres organisés certains corps qui leur sont nécessaires, comme la chaux, soit en formant elle-même certains dépôts.

On sait que le chlorure de sodium est très abondant dans la mer actuelle. En adoptant le chiffre de 2,70 pour 100 comme teneur moyenne, et une profondeur moyenne de 4,500 mètres, ce que l'Océan contient de chlore équivaut à une couche de sel gemme qui couvrirait le globe entier avec une épaisseur de près de 47,6 mètres. Sans qu'il soit possible de supputer la quantité de sel gemme que renferment les terrains stratifiés, on doit croire, en se basant sur ce qui est connu, que cette quantité est bien inférieure à celle qui

[1] Notamment du carbonate de chaux, des chlorures, des sulfates, ainsi que de l'acide silicique.

se trouve dans ce vaste réservoir de chlorure de sodium en dissolution[1].

Les dépôts de sel gemme, qui se rencontrent dans les terrains stratifiés à des étages très variés, ont été généralement attribués à une simple évaporation de l'eau de mer, telle qu'on en observe dans les marais salins; ils ressemblent plus encore à des couches épaisses que l'on a rencontrées et coupées dans les lacs Amers, lors du creusement du canal de Suez. Cependant, quand on examine les conditions dans lesquelles se présente le sel gemme, la manière dont de puissantes couches de cette substance sont souvent étagées les unes au-dessus des autres, leur association à des argiles rougies et bariolées par le peroxyde de fer anhydre, l'absence habituelle d'animaux, on reconnaît que cette première supposition, bien que paraissant la plus naturelle, n'explique pas certaines conditions générales du problème, ainsi que l'a montré Élie de Beaumont[2].

En raison de ces difficultés, certains géologues à la suite de Breislack, de Charpentier, de Paul Savi, ont rapproché le sel gemme qui constitue des masses stratifiées de celui qui se sublime aux abords des volcans, et y ont vu des produits d'anciennes solfatares sous-marines. Mais cette seconde supposition provoque encore plus d'objections, et n'a pas été généralement admise.

Si l'on prend pour exemple le gisement si remarquablement complet de Stassfürt, on y trouve les diverses substances salines que la mer peut fournir, étagées les unes audessus des autres, dans l'ordre même où la mer les dépose-

[1] A part ces massifs de sel gemme, le chlorure de sodium imprègne, mais en faible quantité, un grand nombre de gîtes variés, ainsi que l'indiquent beaucoup d'analyses. Les roches éruptives récentes en renferment souvent des quantités notables. Le chlore s'y trouve d'ailleurs combiné dans des silicates, tels que la la sodalite et la néphéline.

[2] Élie de Beaumont, *Explication de la carte géologique de la France*, t. II, p. 94, 1848.

rait en s'évaporant. Il est donc difficile, sans doute, de ne pas voir dans ces dépôts, quelque puissants qu'ils soient, des résidus que l'Océan a formés pendant la période permienne. Toutefois, si cette évaporation avait eu lieu à la température ordinaire, même à celle des régions tropicales, comment des sels déliquescents, tels que la carnallite, auraient-ils été conservés? Comment, sans parler de la présence du borate de magnésie ou stassfurtite, auraient cristallisé, au milieu de ces dépôts, l'oligiste, le quartz limpide avec des formes très nettes, l'anhydrite en cristaux complets, comme on ne le connaît guère ailleurs, et la boracite[1]? Les couches de sel gemme de Wieliczka, avec la barytine qui leur est associée, et les dépôts de soufre qui les avoisinent, ainsi que bien d'autres gîtes de sel, témoignent dans le même sens.

L'origine des principaux gîtes de sel gemme rappelle donc deux influences, comme si l'évaporation de l'eau des mers, à laquelle ils paraissent devoir leur origine, avait été provoquée, non par la seule action de l'atmosphère, mais par des émanations chaudes provenant de l'intérieur[2].

La formation de la dolomie dans bien des gisements donnerait lieu à une conclusion du même genre. Dans beaucoup de cas, elle a pu se précipiter directement, ainsi qu'on l'a vu dans de l'eau minérale de Lamalou, qui avait été abandonnée à elle-même. Cependant l'association si fréquente de la dolomie à des dépôts métallifères qui en sont contemporains doit faire croire à une certaine parenté avec ces derniers. Les amas de calamine de la Belgique, de la Silésie,

[1] *Leonhards Jahrbuch für Mineralogie*, 1871, p. 844.

[2] Cette observation est confirmée par la formation du sulfate de chaux anhydre ou anhydrite, qui est fréquent et qui le serait sans doute davantage, s'il ne s'était souvent hydraté depuis son dépôt, comme il le fait encore. Les expériences intéressantes, que Gustave Rose a faites sur la formation de l'anhydrite, en présence d'une dissolution de chlorure de sodium, sont à mentionner ici. *Leonhards Jahrbuch*, 1871, p. 932.

de la Pologne et de la province de Santander, la dolomie zincifère de l'Angleterre, celle de la France centrale, par exemple, de Durfort (Lozère), de Combecave (Lot), d'Allouc (Charente), les gîtes de galène des Alpujarras, les gîtes de manganèse de Nassau, en sont des exemples.

Si donc, dans certains gisements, l'eau de mer a contribué à former les couches de dolomies, c'est probablement sous l'influence d'actions souterraines. Supposons, par exemple, que des sources chargées de carbonate de soude, telles que celles qui jaillissent en grand nombre en Auvergne et dans bien d'autres contrées volcaniques, soient arrivées dans l'Océan, elles ont dû provoquer, aux dépens des substances qui préexistaient dans ce dernier, sulfates de chaux, de magnésie et chlorure de magnésium, un précipité de carbonate de chaux et de carbonate de magnésie, c'est-à-dire formé de calcaire plus ou moins magnésien, sous l'influence de réactions du genre de celles qu'a signalées et étudiées Forchhammer.

Ainsi, beaucoup de dépôts de sel gemme, de dolomie et de gypse, malgré des liens de filiation qui les unissent évidemment aux éléments normaux de la mer, paraissent, d'autre part, se rattacher à des émanations souterraines, de manière à faire supposer que ces dernières ont pu en provoquer la formation.

Depuis les temps les plus reculés, la mer est donc comme un vaste entrepôt. D'une part, elle n'a cessé de recevoir des apports, les uns externes, les autres internes ; d'autre part, à tous les âges, elle s'est dépouillée de substances qu'elle contenait originairement ou qu'elle avait ainsi emmagasinées, en les enfouissant, parfois sous la forme organique, dans des sédiments où, depuis lors, elles sont restées en grande partie.

Une observation analogue s'applique à l'atmosphère, dont

la teneur en oxygène et en acide carbonique a été influencée par la décomposition des roches et par la formation des terrains stratifiés, ainsi que l'a montré Ebelmen.

Si l'on avait la prétention de tenter d'établir, pour les anciennes périodes, une sorte de compte courant de la mer et de l'atmosphère, il serait difficile de ne pas commettre des cercles vicieux : les contingents fournis par l'un et par l'autre milieu présentent un caractère simulé et empreint d'exagération, par suite des emprunts incessants qu'ils ont faits eux-mêmes aux régions profondes.

Cependant, à en juger par la persistance de certaines familles d'animaux, on peut supposer que les deux océans gazeux et liquide qui servent de milieu à la vie n'ont pas aujourd'hui une composition chimique fort différente de celle qu'ils présentaient dans les périodes reculées où se déposaient les premières couches fossilifères. Ces deux milieux, en présence de réactions complexes et variées dont ils ont été le siège, se seraient sans doute plus considérablement modifiés, si la stabilité de chacun d'eux n'était pas entretenue par des antagonismes et par une tendance à l'équilibre, tels qu'ils s'en rencontre de toutes parts dans la nature. Mais le laps de temps qui comprend l'histoire de l'homme, et surtout celui sur lequel portent des observations précises, sont trop courts, pour que l'on arrive à ce sujet à des conclusions, qu'il faut abandonner à nos successeurs.

En résumé, d'après les observations qui viennent d'être présentées, la mer, quelle qu'ait été sa salure originelle, ne paraît pas avoir pu renfermer, à la fois, tous les corps qui s'en sont séparés pour constituer les terrains stratifiés.

D'une part, l'écorce granitique lui a graduellement fourni des matériaux, tant par sa propre trituration que par voie de décomposition.

D'autre part, pendant la série des périodes géologiques, la mer a successivement emprunté des substances à des régions du globe qui semblaient être trop en dehors de son action pour devenir ses tributaires, à ces parties profondes d'où viennent les roches éruptives et les filons. La mer a mis en œuvre ces diverses substances, souvent après qu'elles avaient subi préalablement des décompositions chimiques ou qu'elles avaient passé par la vie. Elle a agi sur elles par les mêmes procédés que sur les substances qu'elle enlevait à la surface. Elle les a disposées également en couches régulières, les a associées à des matériaux arénacés, y a souvent distribué de nombreuses dépouilles de ses habitants, comme si elle avait cherché à s'assimiler ces épaves et à les naturaliser dans son domaine. Aussi, pour discerner aujourd'hui la patrie originelle de ces corps, faut-il recourir à une enquête approfondie et difficile, qui n'est pas sans analogie avec celle à laquelle on procède pour les divers peuples, lorsque, par l'étude des langues, on cherche à reconnaître les races qui, à des époques très reculées, se sont superposées et unies entre elles.

Toutefois, la distinction des corps constitutifs des terrains stratifiés en deux catégories, quant à leur provenance, ne peut toujours s'établir d'une manière absolue ; car les masses silicatées externes et internes ne diffèrent pas entre elles d'une manière complète, et certains corps, tels que le calcium, le fer, le silicium, le phosphore et le soufre, se rencontrent dans les unes et dans les autres. C'est ainsi que la vapeur d'eau fournie par les exhalaisons des volcans concourt à former la pluie, avec celle qui a pris naissance à la surface même du globe.

Ainsi l'examen approfondi de la composition des terrains stratifiés nous apprend, non moins clairement que celle des filons métallifères et de divers autres effets que nous avons

passés en revue, combien paraît avoir été considérable l'intervention des parties internes du globe et des eaux souterraines. C'est ce qui explique pourquoi il a paru nécessaire d'entrer ici dans d'assez longs développements à ce sujet.

OBSERVATIONS GÉNÉRALES ET CONCLUSIONS

LUMIÈRES DONT S'ÉCLAIRENT RÉCIPROQUEMENT LES PHÉNOMÈNES PASSÉS ET PRÉSENTS

Après avoir examiné les eaux souterraines dans la série des temps géologiques, aux divers points de vue de leur régime, de leur température et de leur composition, nous saisissons, d'une part, comment les faits présents éclairent les faits anciens, ainsi qu'il arrive pour bien d'autres phénomènes de l'histoire du globe; d'autre part, de quelle manière heureuse les vestiges très variés des eaux dans les périodes géologiques agrandissent notre champ d'observations et nos vues théoriques.

Il nous suffira donc d'ajouter à ce qui précède un petit nombre d'observations.

§ 1. — EFFETS VARIÉS QUI PERMETTENT DE SUIVRE L'ITINÉRAIRE DES ANCIENNES EAUX A TRAVERS L'ÉCORCE TERRESTRE.

Des indices variés permettent très souvent de suivre avec certitude les mouvements auxquels ont obéi, pendant les

anciennes périodes, les eaux souterraines, à travers l'écorce terrestre. Leurs itinéraires se sont en quelque sorte stéréotypés, par les effets très divers qu'elles y ont produits.

Quelquefois, c'est une simple dissolution, comme il arrive dans les couches des terrains stratifiés, où les tests des fossiles ne sont plus représentés que par leurs moules.

Ailleurs, ainsi qu'on l'observe dans les roches silicatées, ce sont des effets de décomposition ayant produit le kaolin, les substances du groupe de la terre verte et de la chlorite ou la serpentine.

Le plus souvent, ce sont des minéralisations, dont les types sont très différents, suivant les conditions où elles se sont opérées.

C'est, par exemple, ce qu'on observe fréquemment dans les terrains stratifiés où sur certains points, les débris organiques, végétaux ou animaux, ont été silicifiés.

On a vu aussi avec quelle évidence la production des zéolithes et des minéraux connexes, agates et autres, accuse le parcours et l'action chimique des eaux, qui leur ont donné naissance, dans de vastes massifs de roches éruptives.

Dans cet exposé des effets des eaux souterraines, nous avons dû ne pas nous borner aux eaux liquides, libres et courantes; l'eau que renferment les argiles, à l'état de combinaison, quoique solidifiée, combinée et fixée, a eu, au même titre, une action prépondérante dans le développement des phénomènes métamorphiques.

A proximité des roches éruptives, il s'est produit des minéraux qui paraissent déceler également l'intervention d'eaux souterraines. Telle est, autour de nombreuses injections granitiques, la production des macles ou chiastolithes, et des minéraux qui leur sont associés.

Nulle part les effets des eaux souterraines ne sont plus dignes d'intérêt, non seulement pour le minéralogiste et le

mineur, mais aussi au point de vue spécial qui nous occupe, que dans les gîtes métallifères. Les dispositions concrétionnées des minéraux des filons avaient porté à conclure, comme très probable, il y a un demi-siècle, que ces minéraux sont des produits d'incrustation d'anciennes sources thermales. Élie de Beaumont[1] l'a fait voir clairement dans son mémorable travail sur les émanations volcaniques et métallifères, et c'est ce qu'avaient pressenti Fournet, Robert Fox[2] et Constantin von Beust[3].

Non seulement nous voyons les sources thermales jaillir de cassures plus ou moins profondes et dans des gisements rappelant tout à fait ceux des filons métallifères; mais encore nous trouvons, çà et là, en pénétrant profondément dans les canaux d'ascension de ces sources, des fac-similés des dépôts chimiques qui se sont opérés autrefois dans les filons; et cela, sans qu'il soit besoin d'une température très élevée.

Des expériences synthétiques ont achevé la démonstration de l'origine aqueuse de la plupart des espèces minérales des filons.

Aux exemples d'analogies qui unissent aux sources actuelles la disposition des anciens épanchements métallifères, on peut ajouter celui que fournissent les environs du Kronthal en Alsace (fig. 156).

Enfin, bien des effets d'élargissement et d'épanouissement des gîtes métallifères se montrent en rapport évident avec la porosité, l'état fissuré et la solubilité des roches dans lesquelles se répandaient les sources minéralisées, et c'est ce qui ressort de la manière la plus claire, par exemple, pour les gîtes de calamine.

Mais on ne doit pas oublier qu'il a fallu, pour donner

[1] *Bull. Soc. Géol. de France*, 2e série, t. IV, p. 1249, 1847.
[2] *Observations on mineral veins*, 1837.
[3] *Critische Beleuchtung der Wernerschen Gangtheorie*, 1840.

naissance à des gîtes métallifères, non seulement que des sources jaillissent, mais aussi que quelques-unes de leurs

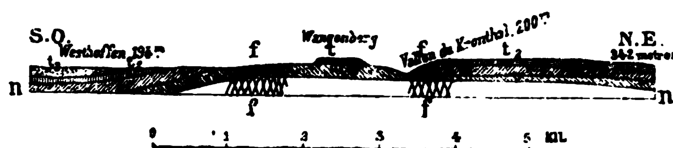


Fig. 156. — Épanchement de baryte sulfatée, sous forme de veines f f, à travers le grès vosgien V, des environs du Kronthal près Vasseloune, en Alsace. — t_1, grès bigarré; t_2, muschelkalk; t_3, marnes irisées; n n, niveau de la mer.

combinaisons fussent arrêtées et fixées sur place, comme insolubles.

La discontinuité des gîtes qui ont incrusté la grande faille du Gard en est un témoin.

§ 2. — OBSERVATIONS SUR LA TEMPÉRATURE DE QUELQUES ANCIENNES EAUX.

Dans un très grand nombre de cas, les anciennes eaux souterraines, dont nous avons constaté les effets, étaient certainement douées d'une température supérieure à la température de la surface du sol. Il ne pouvait en être autrement lorsque, comme il arrive dans les filons métallifères, on peut suivre jusqu'à plus de mille mètres de profondeur le parcours de leurs canaux d'ascension.

D'ailleurs, la nature même du minéral produit témoigne souvent dans le même sens. D'après les faits identiques dont nous sommes témoins aujourd'hui, les eaux dont l'action était assez énergique pour y faire cristalliser des silicates hydratés et même anhydres, ainsi que du quartz, étaient certainement chaudes. On sait en effet que les filons et couches cu-

prifères du Lac Supérieur abondent en épidote qui, de même que les zéolithes du même gisement, est visiblement dû à une action aqueuse[1]. Dans les amas métallifères des environs de Framont (Vosges), du Banat en Hongrie et de Christiania, qui se sont produits dans des roches calcaires de divers âges et à proximité de roches éruptives, le grenat, le pyroxène, la wollastonite et d'autres silicates anhydres que l'on y trouve paraissent avoir été formés avec l'intermédiaire de l'eau, aussi bien que les minéraux métalliques concomitants. L'émeraude en beaux cristaux, que tous les minéralogistes connaissent, a été déposée sur les parois des filons de Muso, Nouvelle-Grenade, où elle est associée au quartz, à la calcite, à la pyrite et au carbonate de lanthane (parisite). Cette pierre gemme ne peut avoir été produite, de même que ces derniers minéraux, que par l'intervention de l'eau, dont la température était assez élevée pour faire cristalliser ce silicate anhydre, sans l'être toutefois assez pour altérer le calcaire noir et le schiste qui forment la paroi de ces filons et que l'on rapporte au terrain crétacé de l'étage néocomien.

Parmi les filons métallifères, ceux qui contiennent le minerai d'étain présentent des caractères minéralogiques particuliers. Tels sont, par exemple, ceux d'Ehrenfriedersdorf en Saxe[2], qui contiennent de la topaze en beaux cristaux ; ceux d'Eibenstock, qui, outre la topaze, renferment du mica et de la tourmaline ; ceux du Cornouailles, où abonde la chlorite. A Piriac (Loire-Inférieure), leur gangue quartzeuse était micacée, et à la Villeder (Morbihan), elle est parsemée de mica fluoré et d'émeraude. Tous ces silicates servent comme de transition aux filons concrétionnés de plomb, de cuivre, d'antimoine, d'argent et d'or qui, dans le voisinage et

[1] Roland Duer Irving, *The Cooper bearing rocks of Lake Superior*, 1883.
[2] Cotta. *Erzgänge*, t. I, p. 48.

ailleurs, ne contiennent pas de silicates anhydres et ont sans doute pris naissance sous l'influence de températures moins élevées.

L'eau dont la vapeur a souvent provoqué les boursouflures dans des roches éruptives anciennes et modernes, avait nécessairement une température élevée. Cette conclusion s'applique, à plus forte raison, à celle qui paraît avoir provoqué l'ascension de certaines de ces roches, comme il arrive encore aujourd'hui, ainsi que l'ouverture des cratères d'explosion.

L'on doit rappeler ici le fait remarquable d'inclusions liquides, de dimension microscopique, moins de $\frac{1}{10}$ de millimètre, quelquefois avec une bulle mobile ou libelle, que M. Sorby a le premier reconnues, bien que la nature de ce ou de ces liquides d'imprégnation n'ait encore pu être nettement déterminée. C'est par milliards que ce savant en a trouvé dans des échantillons de petite dimension. Certains cristaux de quartz en sont tellement imprégnés que le liquide forme environ le $\frac{1}{20}$ de la masse. Il en est de même de la diorite quartzifère de Quenast. Le mode d'association écarte toute idée d'infiltration postérieure.

§ 3. — GRANDES ÉTENDUES VERTICALES ET HORIZONTALES SUR LESQUELLES LES PARCOURS DES ANCIENNES EAUX SONT SOUVENT DISCERNABLES.

Aujourd'hui nous ne pouvons descendre dans les fissures par lesquelles s'exhalent les vapeurs volcaniques, aqueuses et autres. De même, les canaux d'ascension des sources thermales nous sont inaccessibles; leurs colonnes d'eau ascendantes, lors même qu'elles ne seraient pas accompagnées de gaz irrespirables, y mettent complètement obstacle.

C'est seulement vers leur point d'émergence que nous pouvons les observer.

Cette lacune est d'autant plus regrettable que dès qu'on parvient à y pénétrer, seulement jusqu'à quelques mètres de la surface du sol, comme il est arrivé dans les captages de Plombières et de Bourbonne, on rencontre des séries de faits qui font soupçonner combien il serait intéressant, au point de vue de la géologie et de la minéralogie, de descendre plus bas.

Au contraire, quand il s'agit des anciennes époques, les exhalaisons se sont dissipées et les sources ont tari. De plus, les déplacements du sol et ses déchirements naturels ont amené au jour, et sur de grandes étendues horizontales, des parties profondes de l'écorce terrestre et des cheminées dont l'observation est dès lors facile. Et c'est ainsi que nous sommes initiés aux allures des terrains stratifiés et aux changements qu'ils ont subis dans beaucoup de leurs parties.

Pour ce qui concerne les gîtes métallifères en particulier, grâce aux innombrables et vastes excavations qui servent à les exploiter, parfois jusqu'à un kilomètre de profondeur, et où toutes les particularités de leurs allures sont relevées chaque jour avec une exactitude géométrique, ils nous apportent des données bien autrement complètes. Ils nous révèlent, avec détail, le parcours des eaux souterraines sur des kilomètres, aussi bien suivant la verticale qu'en extension horizontale.

La grande longueur des filons qui dépasse fréquemment plusieurs kilomètres, nous fait voir, en outre, le grand développement dans le sens horizontal des nappes aqueuses ascendantes qui les ont engendrés. Les sources thermales actuelles, clairsemées comme elles le sont, même dans les régions privilégiées de l'écorce terrestre où elles abondent,

ne nous laissent apercevoir rien d'analogue. Ces sources ne nous représentent, en effet, que de simples orifices de déversement de réservoirs profonds, qui restent nécessairement invisibles pour nous.

Ces grandes nappes d'eau filoniennes ne constituaient pas des accidents isolés; elles se présentaient ordinairement par groupes naturels, c'est-à-dire avec un *caractère d'unité*. C'est ce qu'attestent d'innombrables champs de filons, par exemple, dans le plateau central de la France, ceux des environs de Pontgibaud (Puy-de-Dôme), de Brioude (Haute-Loire), de Vialas et de Villefort (Lozère). Le Cornouailles, le Derbyshire, le Flintshire, le Harz, les environs de Freyberg, en Saxe, de Schemnitz en Hongrie, le Nevada, l'Utah, le Colorado, le Mexique, le Chili, la province de Victoria, en Australie, où plus de 2000 filons d'or sont connus, et bien d'autres contrées, offrent des exemples de ces systèmes d'anciens filons aquifères. Il arrive même que plusieurs de ces champs de filons, déjà si vastes, sont en connexion mutuelle : ainsi une même bande aurifère et argentifère s'étend, en Amérique, du 42e au 35e degré de latitude nord. Plus au sud, au Mexique, du 30e au 16e degré, on a relevé 4000 à 5000 filons d'argent. Dans toutes ces contrées et dans bien d'autres, il affluait par les cassures profondes de l'écorce terrestre et sur de vastes étendues, des sources thermales présentant des caractères communs et venant y déverser des dissolutions complexes, contenant le zinc, le plomb, l'argent, l'or et bien d'autres substances.

Les groupes d'amas de zinc et de plomb de la Belgique, de la Westphalie, de la Haute-Silésie, de la Pologne, de la Carinthie, de la Grèce, du Wisconsin et des régions adjacentes, de l'Illinois et du Jowa; ceux des gîtes sidérolithiques du Berry, de la Dordogne, du nord-est de la France, de la Suisse, du Wurtemberg, démontrent aussi l'existence probable-

ment simultanée de grands groupes de sources s'étendant en tous sens sur 200 ou 300 kilomètres et au delà, et jaillissant dans des conditions un peu différentes de celles qui ont incrusté les filons.

D'autre part, les apports considérables que l'activité interne a fournis aux terrains stratifiés, attestent l'importance des exsudations aqueuses que le bassin des mers a reçues à toutes les époques.

Dans quelles conditions sont sorties les anciennes sources qui ont engendré les dépôts métallifères, filons, amas, et les couches elles-mêmes?

C'était par des cassures profondes, tantôt à proximité de roches éruptives, tantôt par des failles, tantôt près de vallées anticlinales, comme au Kronthal et à Soultzmatt. Les contacts ont exercé une action favorable, comme on le voit dans les arkoses. Elles ont donc un caractère adventif, qui rappelle celui des sources thermales actuelles (Niederbronn, Soultzmatt).

§ 4. — NOTIONS CHIMIQUES ET MINÉRALOGIQUES DÉDUITES DE LA DIVERSITÉ DES EFFETS PRODUITS.

En même temps que les anciens parcours des eaux souterraines, les dislocations du sol nous permettent de prendre sur le fait et d'étudier dans toutes leurs particularités les résidus des actions chimiques qu'elles ont produites.

Nous avons vu comment l'étude des grands massifs de roches amygdaloïdes avec zéolithes nous donnent le moyen de suivre d'une manière très précise et sur de vastes étendues, aux Féroë, en Islande, aux États-Unis, au Canada, dans le Dekkan et ailleurs, le mouvement des eaux qui leur ont

donné naissance. Leur vitesse était probablement très faible; cependant, en suivant avec soin les effets qu'elles ont produits, on peut se représenter le régime de ces infiltrations à travers les pores des roches, avec leurs limites et dans tous leurs détails, à peu près avec autant de certitude et de précision que si l'on en était témoin.

Les espèces minérales ont successivement incrusté les filons métallifères dans la suite des âges. En général, elles n'y sont pas uniformément réparties; très souvent elles forment des colonnes irrégulières et des accumulations diverses, parfois en rapport avec la nature des roches encaissantes.

§ 5. — ÉCONOMIE DES EAUX SOUTERRAINES D'UNE MÊME RÉGION A TRAVERS DES PÉRIODES GÉOLOGIQUES : APPARITIONS, STABILITÉ, DISPARITIONS.

Considérées à l'époque actuelle et pendant les temps historiques, les sources thermales paraissent jouir d'une grande stabilité. Celles qui étaient connues et utilisées dans l'antiquité, et elles sont nombreuses, car les Romains savaient les trouver jusque dans les parties les plus sauvages et les plus reculées de leur empire, — conservent encore aujourd'hui toute leur vogue. Il en est des exemples sur une foule de points de l'Europe, de l'Asie et de l'Afrique, comme Plombières, Bains, Luxeuil, Bourbonne, Saint-Honoré, Bourbon-Lancy, Bourbon-l'Archambault, Néris, le Mont-Dore, Chaudesaigues, Luchon, Arles ou Amélie-les-Bains, Balaruc, Ax, Dax, Aix-les-Bains, Aix-en-Provence, Uriage, Baden-Baden, Badenweiler, Bade-en-Argovie, Aix-la-Chapelle, Bath, Buxton, Hammam Meskoutine et d'autres.

Mais ce nombre de siècles est bien restreint, comparé à la longueur des périodes géologiques et cette stabilité n'est

qu'apparente. Il faut remonter au delà de l'époque présente pour apprécier les conditions de persistance des sources. En procédant ainsi, nous constatons clairement sur une foule de points la longue durée de beaucoup d'anciennes sources, thermales et minérales. Les filons métallifères, par exemple, nous montrent toute une série de dépôts cristallins, formés lentement et successivement. Souvent ils ont été interrompus lorsqu'ils étaient déjà solidifiés, puis brisés, et leurs débris cimentés par d'autres précipités d'une nature différente qui leur ont succédé.

Toutefois ces émanations aqueuses ont une fin, comme elles avaient eu un commencement, et souvent même on a précisé la date géologique de chacun de ces deux termes limites. Il en est ainsi lorsqu'elles sont associées à des roches stratifiées d'un âge bien déterminé. Comme on le voit, par exemple, sur les contours du massif granitique de la France centrale où les principales émissions paraissent avoir commencé pendant le dépôt des marnes irisées et s'être continuées pendant celui l'infralias et postérieurement[1].

Néanmoins, pendant la longue durée d'activité de ces émanations, il survenait, dans une même contrée, des changements notables, soit dans la situation relative de leurs dépôts, soit dans leur nature même, comme on le voit très fréquemment dans les gîtes métallifères, où l'âge relatif des principaux minéraux constitutifs se fait clairement reconnaître par l'ordre régulier de leur superposition. La Saxe et le Cornouailles présentent des exemples classiques de cette succession; dans ce dernier pays, l'âge plus récent des filons de cuivre par rapport à ceux d'étain a été depuis longtemps reconnu par les rejets que les travaux des mines y ont constatés.

[1] *Bulletin de la Société géologique de France*, 3e série, t. VII. p. 771.

§ 6. — ASSOCIATION DES SOURCES MINÉRALES ACTUELLES A DES GITES MÉTALLIFÈRES.

En général les anciennes sources thermales qui ont apporté les minerais métalliques et leurs gangues dans les filons de tant de régions sont aujourd'hui taries. C'est ainsi qu'il n'en jaillit plus à la surface dans des régions sillonnées de filons, comme le Cornouailles et la Saxe. Cette disparition peut résulter de ce que ces sources ont obstrué leurs canaux par leurs propres incrustations, comme à Vichy ou à Carlsbad, où les eaux actuelles aveuglent leurs orifices de sortie; ailleurs le même effet paraît souvent avoir été produit, parce que des mouvements du sol ont fermé les canaux ou ont amené des changements de niveau, causes nécessaires d'un tarissement.

Toutefois, en bien des localités, sur le canal même d'ascension d'anciennes sources métallifères, c'est-à-dire sur le filon qu'elles ont engendré, un jaillissement d'eaux thermales se poursuit encore aujourd'hui. C'est ce qui résulte des faits exposés précédemment avec détails, tome I, p. 280-289, et t. II, p. 177-181.

Ainsi nos sources thermales se montrent comme une continuation d'autres qui, sur les mêmes points, ont duré des périodes géologiques entières, témoignant ainsi d'une persistance remarquable dans ces phénomènes. Rien ne prouve d'ailleurs que ceux-ci ne continuent pas aujourd'hui à se produire dans ces mêmes cassures, mais à des profondeurs où nous ne pouvons les observer. Rien ne prouve que la formation des minéraux filoniens soit arrêtée.

Par exemple, à Plombières, il y a une analogie de compo-

sition entre les sources actuelles et les dépôts des filons qui les ont précédées. Elles contiennent encore des fluorures et déposent encore du spath fluor; en outre, elles renferment du silicate alcalin en dissolution. Or mes expériences ont prouvé qu'une telle eau suréchauffée précipite du quartz cristallisé. Ces traits de ressemblance expliquent comment les filons de Plombières, formés de quartz et de spath fluor et l'énorme dépôt quartzifère de la vallée des Roches, peuvent être par leur origine en relations très intimes avec les sources de l'époque actuelle.

§ 7. — LIAISON DES PHÉNOMÈNES INTERNES, APPARITION DE ROCHES ÉRUPTIVES OU MOUVEMENTS DU SOL, AVEC LES ALLURES GÉNÉRALES DES EAUX SOUTERRAINES. — MODIFICATIONS DES EFFETS DES EAUX SOUTERRAINES A TRAVERS LES PÉRIODES GÉOLOGIQUES. — AGE RELATIF DES GITES MÉTALLIFÈRES.

En se remplissant d'incrustations, les canaux d'ascension ont pu s'obstruer au point de se fermer complètement. Cependant, en général, la disparition des anciennes sources thermales, ainsi que leur apparition, paraissent avoir été en rapport avec des phénomènes dynamiques émanant de l'intérieur du sol : apparition de roches éruptives ou mouvement d'exhaussement ou d'abaissement du sol.

Ces relations se manifestent surtout clairement dans les gîtes métallifères, qui se sont produits exclusivement dans les contrées disloquées et souvent traversées d'éruptions de roches. Elles ont été reconnues et précisées dans tous les districts de mines qui ont été convenablement étudiés.

Tel est celui de Vialas où, à part les failles postérieures qui sont restées vides, Rivot a reconnu plusieurs espèces de

filons dans lesquels les matières minérales ont pénétré à des époques successives. A Przibram, en Bohême, où se trouvent ensemble 24 corps simples, formant 60 combinaisons différentes, on distingue trois groupes répondant tout à la fois à des phénomènes de réouverture et à des variations dans la nature chimique des émanations profondes : 1° une venue sulfurée, c'est-à-dire sulfures, arseniures, antimoniures de plomb, de zinc, de cuivre, de nickel, de cobalt, d'argent; 2° une venue barytique; 3° une venue de calcaire dolomitique. Ces dépôts successifs ont été eux-mêmes brisés, remaniés et réagglutinés par des substances plus récentes[1].

Rien de plus frappant que les relations des filons argentifères et aurifères de la Hongrie[2] et de la Transylvanie avec les épanchements trachytiques; connexion qui se reproduit dans les montagnes Rocheuses, comme on l'a vu tome II, p. 179.

Le Laurium nous a montré plus haut l'influence génératrice des filons d'eurite sur l'arrivée des émanations plombifères, zincifères et ferrifères.

Les circonstances dans lesquelles ont pris naissance ces gîtes métallifères et bien d'autres, offrent une analogie frappante avec celles qui président aujourd'hui à l'apparition de nombreuses sources thermales.

Par exemple celles de l'Allier, notammênt celles de Néris et Bourbon l'Archambault, se lient intimement à l'apparition de pegmatites et de porphyres[3].

Des émanations métallifères se sont produites depuis les époques les plus reculées de l'histoire du globe jusqu'aux plus modernes. Beaucoup de gîtes métallifères sont contemporains du gneiss; tels sont les nombreux amas de fer de

[1] Michel Lévy et Choulette. *Annales des mines*, 6e série, t. XVI, p. 129, 1869.
[2] Von Richthofen. *Studien der Ungarischen Siebenburgen Trachytgebirges*, 1861.
[3] Michel Lévy et Vélain. *Mémoire précité.*

la Suède et de la Norvège, de Mokta-El-Hadid, près de Bône, ceux de même nature si développés aux États-Unis et au Canada, notamment dans l'État de Michigan et dans celui de New-York, à Marquette, et ceux non moins considérables du Brésil. Tels sont encore, en Scandinavie, les gites de cobalt de Tunaberg, Modum et Skuterud; les *fahlband* argentifères de Kongsberg.

D'autres émanations se sont produites pendant la période silurienne, par exemple aux États-Unis, où elles ont continué à l'époque dévonienne, tandis que se produisaient les importants gîtes de fer du Nassau, de la Westphalie et du Harz. Dans bien des parties de l'Europe, les époques permienne et triasique ont été marquées par l'arrivée de métaux divers: telles sont les couches cuivreuses du Mansfeld et du pays de Perm; les amas plombifères de Commern (Prusse Rhénane); les dépôts zincifères de l'Angleterre; en France, ceux des dépôts du Gard, de l'Ardèche, du Var, des Alpes-Maritimes, du Lot et du Tarn; ceux de la Silésie, de la Lombardie, des Alpes autrichiennes, de l'Espagne, etc.

Des arrivées de métaux non moins importantes ont continué pendant la période du lias, par exemple autour du plateau central de la France, où elles avaient commencé dès la période triasique (Saône-et-Loire). C'est à cette époque qu'appartiennent d'innombrables épanchements quartzeux et barytiques, ainsi que les gîtes de galène de Melle (Deux-Sèvres) et d'Alloue (Charente).

En même temps que de grandes dislocations, la période tertiaire a été également témoin de l'arrivée de beaucoup de métaux. A part les dépôts sidérolithiques, on peut mentionner ceux de la Toscane, de l'île d'Elbe, de l'Algérie (calamine du Djebel Nadir), et du Banat. C'est à cette époque qu'il convient de rapporter les filons d'argent et d'or de la Hongrie, de la Transylvanie, des Montagnes Rocheuses, du

Mexique et du Nicaragua. Les filons de Schemnitz sont attribués à la fin du miocène, alors que s'accomplissaient à proximité les éruptions rhyolitiques; ceux de Comstock, associés au grünstein trachytique, appartiennent également à l'époque tertiaire moyenne.

Quand des roches éruptives de nature différente se sont succédé, les gîtes métallifères apportés à leur suite ont eux-mêmes varié. On voit, par exemple, que l'étain est associé à des roches silicatées acides, tandis que le plomb est en connexion avec des.roches basiques.

C'est à des variations analogues dans les émanations qu'a reçues le bassin des mers aux époques correspondantes que paraissent devoir être attribués, en partie, les changements présentés par la série des terrains stratifiés dans des caractères minéralogiques.

Certaines de ces époques, comme celles du permien et du trias en Europe et dans une partie de l'Amérique, ont été privilégiées, au point de vue de ce double tribut des régions internes.

On voit que les gîtes métallifères peuvent être considérés comme une sorte de quintescence des régions profondes, conformément à l'idée lumineuse si bien exposée par Descartes et longtemps méconnue.

Ainsi que nous l'avons vu, les apports internes paraissent s'être opérés en grande partie sous l'influence d'infiltrations d'eau, qui, après être descendues de la surface du globe, seraient remontées des régions profondes, associées à des substances qu'elles ont dissoutes ou entraînées. C'est ce qui arrive chaque jour encore, dans le mécanisme des sources thermales et probablement aussi des exhalaisons volcaniques. D'après ces considérations, on voit combien paraît avoir été considérable la circulation interne de l'eau. C'est

une sorte de *circulation souterraine* et *profonde* qui remonte aux plus anciennes périodes. Beaucoup de substances gazeuses ou dissoutes auraient ainsi traversé l'écorce granitique par des fissures profondes, et seraient arrivées à la surface par une sorte de *transpiration* et de *transsudation*, emportant constamment aussi avec elles une certaine quantité de la chaleur interne.

Depuis quelque temps l'importance du rôle de la chaleur intérieure a été attaquée, surtout en Allemagne et en Angleterre. Des arguments de divers ordres ont concouru à ce but et tendraient à ramener quelques géologues presque à la doctrine de Werner, qui suppose ces régions profondes à peu près inertes. C'est à la suite d'exagérations dans lesquelles on s'était laissé entraîner, quand les théories nouvelles sur cette chaleur intérieure venaient de triompher, que s'est produit ce mouvement dans les idées, en sens inverse de celui auquel il succédait. La loi générale d'action et de réaction se montre donc dans les trois phases que cette question fondamentale de la géologie a traversées depuis la fin du siècle dernier, c'est-à-dire depuis Hutton.

Cependant, à mesure qu'on étudie mieux l'écorce solide, on y reconnaît des preuves de plus en plus nombreuses de l'intervention de l'activité interne. Les terrains stratifiés eux-mêmes, comme nous venons de le reconnaître, nous fournissent des arguments qui témoignent dans le même sens que les roches éruptives et les roches métamorphiques. Non seulement cette activité interne a fait émerger d'anciens fonds de mer, en a ployé et brisé les strates, mais aussi elle a contribué à la formation directe de ces mêmes dépôts.

De même que l'examen des roches sédimentaires a déjà jeté une lumière inattendue sur l'histoire de la vie, de même des phénomènes qui, au premier abord, paraissent appartenir exclusivement au domaine de l'eau, contribuent à faire

ressortir l'importance et la diversité des rôles de la chaleur intérieure.

§ 8. — GÉNÉRALITÉS : LUMIÈRE DONT S'ÉCLAIRENT RÉCIPROQUEMENT LES PHÉNOMÈNES PASSÉS ET PRÉSENTS.

Les caractères extérieurs d'un animal et ses sécrétions ne font connaître sa constitution que bien incomplètement, tant que l'anatomie n'a pas pénétré dans ses organes intérieurs et dans ses tissus; de même, les sources thermales actuelles, telles qu'elles se présentent à la surface du globe, même quand on associe l'examen de leurs affleurements à celui de la constitution géologique de la contrée et des conditions dans lesquelles elles jaillissent, ne sauraient suffire à faire connaître avec précision leur économie générale. Il n'en est plus de même dès que nous en rapprochons les caractères des anciennes sources. Pour celles-ci, en effet, il nous est donné de suivre leur parcours sur de vastes étendues, verticalement aussi bien qu'horizontalement, et dans ses particularités les plus intimes. C'est donc bien l'équivalent d'une sorte d'injection anatomique et d'une étude démonstrative.

De plus, ce même examen nous dévoile les réactions chimiques qui ont été le résultat final de leur travail.

De même que la série des animaux fossiles complète celle des animaux vivants, l'étude des anciennes eaux souterraines, dans leurs parcours et dans leurs produits, complète l'histoire des eaux souterraines actuelles et en agrandit considérablement le tableau. Dans cette circonstance, plus encore que dans bien d'autres, l'étude des faits du passé

ne réfléchit pas moins de lumière sur les faits actuels qu'elle n'en reçoit.

L'importance du rôle de l'eau à la surface du globe est attesté aujourd'hui par les effets considérables qu'elle produit chaque jour à la surface des continents, ainsi que dans le bassin des mers.

L'énorme développement des terrains stratifiés fait apprécier ce qu'elle a été aux époques anciennes.

Sans produire des résultats tout d'abord aussi frappants, les eaux souterraines ont et ont eu aussi une part considérable dans l'économie de la croûte terrestre. On s'en rend facilement compte : de toutes parts, dans les continents comme dans l'Océan, grâce à son extrême et incessante mobilité, ainsi qu'à sa propriété de mouiller les substances pierreuses, l'eau a trouvé accès, comme elle trouve encore chaque jour dans les roches, soit qu'elle s'y infiltrât visiblement et rapidement, soit qu'elle s'y infiltrât avec lenteur. De plus, dans son trajet, quelque lent qu'il soit, elle est devenue un agent de réaction chimique, d'autant plus puissant qu'elle acquérait une plus haute température, en descendant plus avant dans l'intérieur du globe, ou parfois en s'approchant de masses éruptives encore chaudes. Son action propre était d'ailleurs aidée des substances qu'elle dissolvait et entraînait avec elle. L'eau de constitution de certaines roches hydratées, telles que les argiles, non moins puissamment que l'eau de pénétration, a suffi pour engendrer de nombreuses espèces minérales et faire naître un état cristallin.

L'expérimentation synthétique a appris quelle est l'énergie chimique de l'eau, notamment pour la cristallisation du quartz et des silicates, même quand elle ne se trouve qu'en très faible quantité.

Or, les conditions si difficiles à réaliser dans des expé-

›s, à cause des pressions énormes que les appareils ıt supporter, sans éclater et sans permettre des fuites, ıt trouvées associées, pour ainsi dire, d'une manière ıle et même nécessaire, dans les profondeurs du L'eau et la chaleur emprisonnées dans l'intérieur ›ches ont pu, de toutes parts, y combiner leurs actions antes.

·st ainsi que l'eau a joué de tout temps un rôle unique l'écorce terrestre ; aidée, il est vrai, de substances secon›s, elle a été le *minéralisateur* par excellence, même ı des minéraux, tels que le quartz et les silicates anhy›, en présence desquels elle est tout à fait inerte, aux ıpératures qui règnent à la surface du globe et dont, pour motif, on avait longtemps cru l'origine en dehors de son ›maine.

Il ne s'agit d'ailleurs pas seulement du passé. Rien ne ›ouve que les faits de ce genre soient arrêtés. Il est au con›aire plus que probable que, chaque jour encore, des actions ›emblables concourent à la formation de nouveaux minéraux; mais elles ont lieu dans des régions intérieures qui ne sont pas accessibles à nos observations. En descendant à quelques mètres à peine de la surface, nous trouvons des silicates de la famille des zéolithes et des combinaisons sulfurées semblables à celles des filons métalliques. Malheureusement nous ne pouvons observer les produits de réactions qui se développent, nécessairement plus bas, dans les canaux d'ascension de ces sources ou à proximité des laboratoires des volcans. L'eau suréchauffée, qui se trahit au dehors par des sources thermales et des exhalaisons volcaniques, doit produire lentement et silencieusement, dans l'intérieur du globe, des effets considérables et permanents et, comme autrefois, donner naissance à des minéraux variés.

Dans son incessante circulation souterraine et profonde,

et par son travail principalement chimique, l'eau simule une sorte d'action vitale qui s'est perpétuée dans l'écorce terrestre, à travers tous les âges de notre planète.

Son action minéralogique et géologique, aussi importante que variée, est digne de l'attention de tous : elle peut être qualifiée par l'épigraphe empruntée à Leibnitz : *in varietate unitas*.

TABLE ALPHABÉTIQUE

DES MATIÈRES

TABLE ALPHABÉTIQUE

DES LOCALITÉS CITÉES

TABLE ALPHABÉTIQUE

DES AUTEURS CITÉS

TABLE DES MATIÈRES

LIVRE PREMIER

FORMATION DES ZÉOLITHES ET DES MINÉRAUX CONNEXES

LIVRE DEUXIÈME

FORMATION DES GITES MÉTALLIFÈRES ET DES TRAVERTINS

LIVRE TROISIÈME

CHANGEMENTS SURVENUS DANS LES ROCHES DEPUIS LEUR FORMATION

PREMIÈRE PARTIE

TRANSFORMATIONS DIVERSES DES ROCHES

DEUXIÈME PARTIE

MÉTAMORPHISME

LIVRE QUATRIÈME

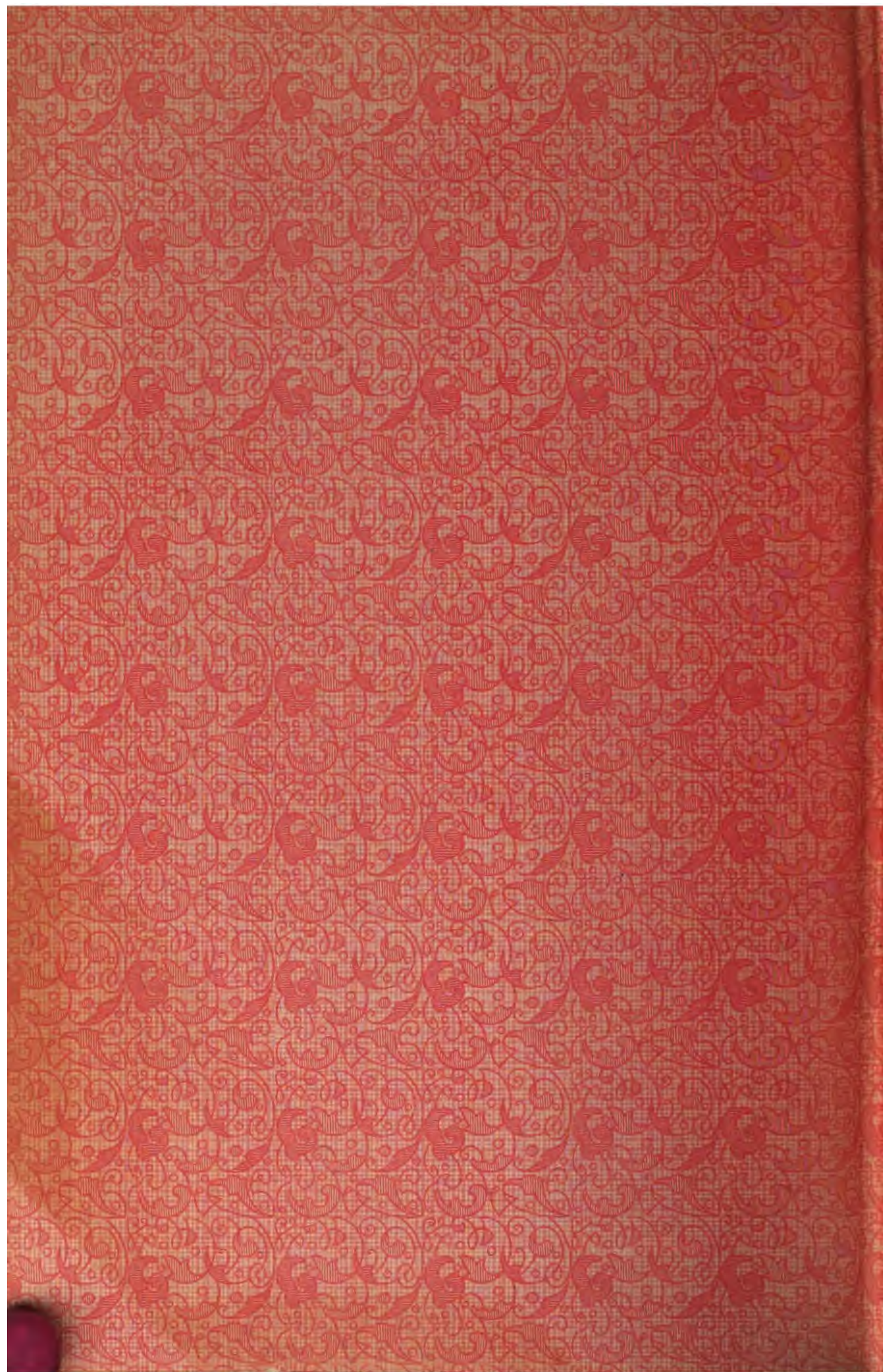
RÔLE DES EAUX SOUTERRAINES DANS L'ORIGINE DES SUBSTANCES CONSTITUTIVES DES TERRAINS STRATIFIÉS

OBSERVATIONS GÉNÉRALES ET CONCLUSIONS

LUMIÈRES DONT S'ÉCLAIRENT RÉCIPROQUEMENT LES PHÉNOMÈNES PASSÉS ET PRÉSENTS

FIN.

13962. — Imprimerie A. Lahure, rue de Fleurus, 9, à Paris.



551.49 .D236a C.1
Les eaux souterraines aux epoq
Stanford University Libraries

3 6105 032 223 898

THE
STANFORD PRESS
BINDERY